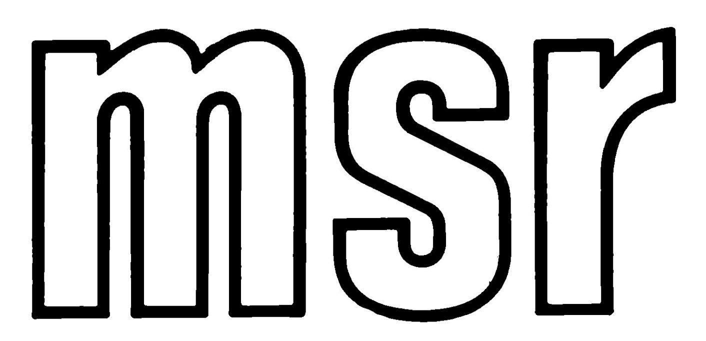
2

1979



messen · steuern · regeln

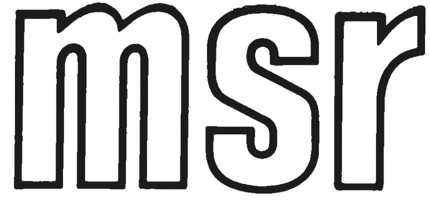
22. Jahrgang
Heft 2
Februar 1979



Index 32525
ISSN 0026-0347

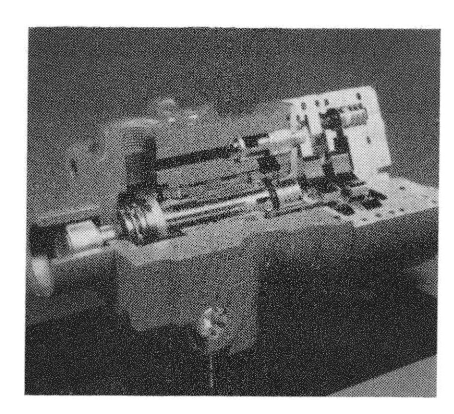
**VEB
Verlag Technik
Berlin**

Verlagspostamt Leipzig
EVP: 4,00 M



messen · steuern · regeln

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift für die Automatisierungstechnik



Unser Bild zeigt das neue Lenkaggregat mit Übersetzungsänderung nach TGL 21535/02 des VEB Kombinat ORSTA-Hydraulik.
Foto: Foto-Richter

Herausgeber:
Wissenschaftlich-technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der KDT

2

22. Jahrgang
Februar 1979

VEB VERLAG TECHNIK

AUFSÄTZE

62 — *V. Fiala*
Beitrag zur Simulation hydraulischer Ventile

65 — *H. Hennig*
Zeit- und Bewegungsverhalten pneumatischer Linearantriebe

71 — *J. Ober*
Anwendung der Entropie bei der Prozeßanalyse von wärmetechnischen Ausrüstungen

72 — *J. Ester*
Optimierung linearer mehrdimensionaler Regelkreise bei hohen Genauigkeitsforderungen mit Hilfe eines Dialogverfahrens Mensch – Kompromißmenge

78 — *M. Krauß*
Zur Grenze der Meßgenauigkeit bei gestörten Übertragungssystemen

81 — *H. Gatzmanga*
Automatische Überwachung prozeßanalytischer Meßeinrichtungen und Anlagen

86 — *D. Chmúrny*
Optimale Steuerung der Produktion von Schwefelsäure mit Hilfe eines Rechners (Teil II)

90 — *H. Grützner* und *A. Hoffmann*
Neue Vorschriften für die Errichtung eigensicherer Anlagen (Teil II)

93 — *M. Peschel*
Modellbildung und Polyoptimierung

97 — *G. Schwarze*
Kombinierte Simulationssysteme

101 — *H.-G. Hildebrandt* und *A. Meißner*
Verhalten modelladaptiver Systeme mit Relais-Adaptionsgesetz

105 — *R. Wolf* und *K. Fiedler*
Elektronische Schaltungen der Automatisierungstechnik (XI)

107 — **TAGUNGEN UND KOLLOQUIEN**

109 — **PERSÖNLICHES**

112 — **TECHNISCHE INFORMATIONEN**

114 — **BUCHBESPRECHUNGEN**

116 — **KURZINFORMATIONEN**

Dipl.-Ing. *V. Fiala*, Prag[1])

Beitrag zur Simulation hydraulischer Ventile

IA 3.2; 4.0.2.1

Einleitung

Elektronische Analog -und Hybridrechner können vorteilhaft zur Simulation hydraulischer Ventile angewandt werden. Die bekannten Vorteile dieser Rechner, z. B. große Anschaulichkeit, einfache Parameteränderung und dadurch gute Bedingungen zur Optimierung, ermöglichen ihre effektive Ausnutzung. Im Staatlichen Forschungsinstitut für Maschinenbau, Prag-Běchovice (SVÚSS), wurden die tschechoslowakischen Rechner MEDA 40 TA und MEDA 41 TC bei der Grundforschung eingesetzt. In diesem Beitrag sollen einige Erfahrungen mitgeteilt werden.

Wie bekannt, werden in letzter Zeit einstufige Ventile nur bei kleineren Ansprüchen angewandt. Trotzdem war es zweckmäßig, diese relativ einfachen Systeme zu simulieren, dadurch Erfahrungen zu gewinnen, um dann mehrstufige Ventile leichter behandeln zu können. Es sollten besonders Stabilitätsprobleme der Ventile untersucht werden (Bedingungen zur Existenz selbsterregter Schwingungen; Einfluß von Pulsationen im Hydrogenerator oder in der Abfallrohrleitung auf die Stabilität). Dabei sollten im Gleichungssystem zuerst alle nichtlinearen Komponenten betrachtet werden. Weiter sollte festgestellt werden, welche Vereinfachungen ohne wesentliche Genauigkeitsminderung durchgeführt werden können.

1. Mathematische Formulierung der Aufgabe

Ein einstufiges hydraulisches Ventil wird mit einer Differentialgleichung 2. Ordnung (Bewegungsgleichung des Schiebers oder des Kegels) und einer Differentialgleichung 1. Ordnung (Zusammenhang zwischen Druck und Menge der Flüssigkeit bei Berücksichtigung der Bewegung des Schiebers usw.) beschrieben. Theoretisch müßten daher zur Simulation drei Integrierer ausreichen. Das Rechenprogramm enthält jedoch noch weitere Kreise zur Simulation des Stoßes (Kegel — Kegelsitz oder Schieber — Schieberanschlag), einen relativ komplizierten Generator einer periodischen, stark nichtlinearen Störfunktion, Speicherkreise zur Aufnahme von Hüllkurven und einige Multiplizierer zur Berechnung der Produkte zeitveränderlicher Funktionen. Die Kapazität der Rechner MEDA 40 TA und MEDA 41 TC wurde daher völlig ausgenutzt.

Als typisches Beispiel des Gleichungssystems gilt:

$$m h^{\cdot\cdot} + \delta h^{\cdot} + \varepsilon h^{\cdot} |h^{\cdot}| + ch + c^* h + c h_p + \sigma h p - F p = 0 \tag{1}$$

$$p = \lambda \int \left(Q_H - kh \sqrt{p} - Q_{nk}\right) dt \tag{2}$$

Bedingung: bei $h \leqq 0 \ldots kh\sqrt{p} = 0,\ \sigma h p = 0$

bei $h > 0 \ldots c^* = 0$.

m Masse des Schiebers oder Kegels; h Auslenkung des Schiebers oder Kegels; δ Faktor der viskosen Dämpfung; ε Faktor der quadratischen Dämpfung; c Federsteifigkeit; c^* Steifigkeit des Anschlags; h_p Vorspannung der Feder; σ Faktor der hydrodynamischen Kraft (Strömungskraft); p Öldruck; F aktive Fläche des Schiebers oder des Kegels; λ Widerstand der Flüssigkeit und der Rohrleitung gegen Deformation; Q_H die vom Hydrogenerator gelieferte Ölmenge; k Durchflußfaktor; Q_{nk} durch die Bewegung des Schiebers freigegebene Ölmenge; t Zeit

Zuerst mußten die Werte aller Konstanten angegeben und die Maßstäbe der Veränderlichen abgeschätzt werden. Dann konnten die Gln. (1) und (2) mit dem bekannten Normierungsverfahren bearbeitet werden, so daß das Gleichungssystem (1a) und (2a) entstand:

$$\begin{aligned}\left(\frac{h^{\cdot\cdot}}{N_{h^{\cdot\cdot}}}\right) = &-\frac{\delta N_{h^{\cdot}}}{m N_{h^{\cdot\cdot}} M_5}\left(\frac{h^{\cdot}}{N_{h^{\cdot}}}\right) - \frac{\varepsilon N_{h^{\cdot}}^2}{N_{h^{\cdot\cdot}}}\left|\frac{h^{\cdot}}{N_{h^{\cdot}}}\right| - \\ &-\frac{c N_h}{m N_{h^{\cdot\cdot}} M_t^2}\left(\frac{h}{N_h}\right) - \frac{c + N_h}{m N_{h^{\cdot\cdot}} M_t^2}\left(\frac{h}{N_h}\right) - \frac{c h_p}{m N_{h^{\cdot\cdot}} M_t^2} - \\ &-\frac{\sigma N_h N_p}{m N_{h^{\cdot\cdot}} M_t^2}\left(\frac{h}{N_h}\right)\left(\frac{p}{N_p}\right) + \frac{F N_p}{m N_{h^{\cdot\cdot}} M_t^2}\left(\frac{p}{N_p}\right),\end{aligned} \tag{1a}$$

$$\begin{aligned}\left(\frac{p^{\cdot}}{N_{p^{\cdot}}}\right) = &\frac{\lambda Q_H}{N_{p^{\cdot}} M_t} - \frac{\lambda k N_h \sqrt{N_p}}{N_{p^{\cdot}} M_t}\left(\frac{h}{N_h}\right)\sqrt{\left(\frac{p}{N_p}\right)} - \\ &-\frac{\lambda F N_{h^{\cdot}}}{N_{p^{\cdot}}}\left(\frac{h^{\cdot}}{N_{p^{\cdot}}}\right).\end{aligned} \tag{2a}$$

Zur Auswertung der relativ komplizierten Ausdrücke in den Gln. (1a) und (2a) hat sich der programmierbare Rechner Hewlett-Packard 9830 A bewährt. Es wurde ein einfaches Programm entworfen, das teilweise dem bekannten HOI (HYTRAN Operator Interpreter) entspricht. In der Konversationssprache BASIC wurden die notwendigen Daten angegeben, Potentiometerwerte berechnet und sowohl die angegebenen als auch die berechneten Werte mit Hilfe eines Schnelldruckers ausgedruckt. Auf diese Weise erhielt man für jede Variante der Aufgabe einen Rechnerausdruck. Selbstverständlich müssen die Bezeichnungen der Konstanten und Veränderlichen den Möglichkeiten des Kalkulators angepaßt werden. Jedenfalls ist es besonders zweckmäßig, alle Eingabedaten für eine gewählte Hauptvariante auf den Spezialschlüsseln (SPECIAL FUNKTION KEYS) vorbereitet zu haben. Dadurch wird nicht nur viel Zeit gespart, sondern auch Möglichkeiten falscher Eingaben ausgeschlossen.

Die mit Hilfe des programmierbaren Rechners 9830 A(HP) berechneten Potentiometerwerte werden dann manuell eingestellt. Man kann also dieses Verfahren als eine Off-line-Kopplung des HP und MEDA bezeichnen. Nach unserer Meinung ist diese Stufe der Zusammenarbeit beider Rechner am günstigsten.

2. Entwurf der Analogrechnerschaltung

Die Gln. (1a) und (2a) dienen als Unterlage zum Entwurf des Schaltbildes. Außerdem müssen noch weitere Hilfskreise, z. B. ein Generator periodischer Signale (Öldruckpulsationen im Hydrogenerator oder in der Abfallrohrleitung); zwei Analogspeicher zur Aufnahme von Extremwerten der Schwingungen und Kreise zur logischen Steuerung der Rechenoperationen, modelliert werden.

---

[1]) Mitteilung aus dem Staatlichen Forschungsinstitut für Maschinenbau Prag-Běchovice.

Die wichtigsten Recheneinheiten zur Simulation der Gl. (1a) sind die Integrierer I 7 und I 8. Die Ausdrücke in den symbolischen Zeichen für die Potentiometer entsprechen den auf dem HP-Rechner berechneten Koeffizienten. Zur Simulation des Stoßes dient der Integrierer I 4 und der als gesteuerter Invertor geschaltete Integrierer I 5. Beide werden durch die logischen Signale des Komparators K3 gesteuert, der bei einer Auslenkung $h \leqq 0$ eine zusätzliche Steifigkeit (I 4) und Dämpfung (I 5) einschaltet. Dabei können die Eingangswiderstände der Integrierer so gewählt werden, daß die resultierende Steifigkeit des Kegels und Kegelsitzes um einige Größenordnungen höher als die Federkonstante ist.
Der Zeitmaßstab muß den Lösungsverfahren angepaßt werden. Für Stabilitätsuntersuchungen sollten Hüllkurven der Schwingungen registriert werden, wobei es zweckmäßig ist, eine möglichst hohe Frequenz der Lösung zu erreichen, um die Rechenzeit zu kürzen. Dagegen wird die Aufnahme von Schwingungsverläufen bei einer sprungförmigen Parameteränderung durch die Eigenschaften des Koordinatenschreibers beeinflußt. Durch Umschaltung der Integrationskondensatoren wird deshalb eine Zeitdehnung durchgeführt.
Zur Aufnahme von Hüllkurven von h und p werden Speicherpaare und Komparatoren angewandt. Die umfangreiche Ausstattung des TC-Rechners ermöglicht eine kombinierte Steuerung: die Extreme der Amplituden $|h_{max}|$ und $|p_{max}|$ werden durch die Signale $h^\cdot$ und $p^\cdot$ gesteuert, und im Fall einer trivialen Lösung werden die statische Auslenkung h und der statische Druck p in den gewählten Zeitintervallen registriert.
Existiert im Gleichungssystem eine periodische Störfunktion (z. B. Schwankungen der Ölmenge im Hydrogenerator oder in der Abfallrohrleitung), dann können im simulierten System entweder erzwungene Schwingungen oder eine Kombination erregter und selbsterregter Schwingungen entstehen. In beiden Fällen ist es zweckmäßig, die Steuerung der Speicherpaare vom Erregersignal abzuleiten.
Bei der Untersuchung des Einflusses von Schwingungen in der Abfallrohrleitung wird aus dem Druck p eine Druckdifferenz $(p - p_0)$, wobei der Öldruck im Abfall p_0 aus einer statischen Komponente p_{01} und einer zeitveränderlichen Funktion $p_{01}^* \cos \omega t$ besteht.
Zur Simulation der Druckpulsationen im Hydrogenerator wurde eine Schaltung entworfen, die eine befriedigende Annäherung der erwünschten Zeitverläufe liefert. Die Gleichung des Zeitverlaufes der von einer Kolbenpumpe gelieferten Ölmenge Q_H

$$Q_H = k_1 \sum_{U=1}^{U=n} \sin [x + 2\pi (U - 1)/n] \quad (3)$$

ist für die Bearbeitung auf einem Analogrechner völlig ungeeignet und wurde daher durch den Ausdruck

$$Q_H = k_2 \cdot \omega \left[A + B \left| \cos 2\pi\, n \frac{N}{60} t \right| \right] \quad (3a)$$

ersetzt.
ω Kreisfrequenz; k_1, k_2, A, B Proportionalitätskonstanten; n Kolbenzahl; N Drehzahl
Der genaue Verlauf wurde mit dem Rechner HP aufgezeichnet und die Konstanten A, B ermittelt. Wie bekannt, können bei einer ungeraden Kolbenzahl kleinere Pulsationen erreicht werden. Die Gl. (3a) gilt für eine idealisierte Kolbenpumpe mit unendlich langer Kurbelstange. Für die Simulation einer Pumpe mit endlichen Werten von r/l (Kurbelradius/Länge der Kurbelstange) gilt Gl. (3b):

$$Q_H = k_2 \omega \, [A + B \, |\cos \omega t| + C \sin \omega t] \, . \quad (3b)$$

Der Zeitverlauf der von einer Taumelscheibenpumpe gelieferten Ölmenge wurde durch die Gl. (3c) approximiert:

$$Q_H = \frac{r}{l} \, \omega \left[A + B \, |\cos \omega t| + \frac{r}{l} \, C \sin \omega t \right]. \quad (3c)$$

Ein Beispiel des Zeitverlaufes wird im Abschn. 3 (Lösungsergebnisse) angegeben.
Die dynamischen Eigenschaften eines Ventils werden üblicherweise durch die sprunghafte Änderung der Ölmenge Q_H gemessen. Diese „Stoßprüfung" kann auf einem Analogrechner leicht simuliert werden. Dabei muß ein wichtiger Umstand berücksichtigt werden: die Vorspannung der Feder h_p verursacht auch bei hoher Steifigkeit des Kegels und Kegelsitzes eine geringe Deformation des Kegelsitzes, die als Anfangsbedingung $h(0)$ beachtet werden muß.

3. Beispiele der Lösungsergebnisse

Theoretisch können in hydraulischen Systemen selbsterregte, erzwungene oder parametrische Schwingungen und auch deren Kombinationen entstehen. Mit Hilfe eines Analogrechners kann man entweder die Zeitverläufe dieser Schwingungen oder auch deren Hüllkurven als Funktionen verschiedener Parameter aufzeichnen. Für den Theoretiker können weiterhin Diagramme in der Phasenebene sehr wertvoll sein; für den Praktiker dagegen ist ein Zeitverlauf des Druckes als Antwort auf eine Sprungänderung eines Parameters viel wichtiger. Einige Beispiele sollen die Anwendungsmöglichkeiten analoger Simulation zeigen.

3.1. *Aufzeichnung selbsterregter Schwingungen*

Bei selbsterregten Schwingungen eines Systems mit Ventilen kann ein minimaler Wert des Dämpfungsfaktors bestimmt werden, bei dem das Ventil noch stabil ist. Hierbei wird empfohlen, den Wert des Dämpfungsfaktors δ kontinuierlich zu ändern und zwei Speicherpaare zur Aufzeichnung der Extremwerte von Druck und Auslenkung anzuwenden. Es ist zu bemerken, daß manchmal ein derartiger Bereich des Dämpfungsfaktors existiert, bei dem zwei stabile Zustände vorkommen (trivial (ohne Schwingungen) und schwingend).
Wird der Dämpfungsfaktor δ von einem kleinen Wert allmählich erhöht, sinkt die Amplitude selbsterregter Schwingungen. Bei δ_2 verschwinden die Schwingungen, und es beginnt der stabile, schwingungslose Zustand. Wird nun die Dämpfung vermindert, setzen die Schwingungen erst bei einem kleineren Wert δ_1 an. Unter gewissen Bedingungen kann dieses Gebiet der Doppeldeutigkeit relativ breit sein. Da die Schwingungen mit einer großen Sicherheit vermieden werden sollen, wird gewöhnlich der Dämpfungsfaktor viel größer als δ_1 und δ_2 gewählt. Dann kommt die Existenz zweier stabiler Lösungen nicht mehr in Frage; es ist jedoch nötig, über diese Möglichkeit entsprechende Kenntnisse zu haben.
Die Diagramme $|p_{max}| = f(\delta)$, $|h_{max}| = f(\delta)$ sind eine wichtige Unterlage über die Einflüsse mehrerer Parameter. So konnte z. B. leicht bewiesen werden, daß eine genaue Simulation der Polynomial-Entwicklung von $\sigma_1 h^i$, $\gamma_1 h^i$ und $k_1 h^i$ nur ganz gering zur Lösungsgenauigkeit beiträgt. Die Ausdrücke

$$\lambda(k_0 + k_1 h + k_2 h^2) \sqrt{p - p_0}\, (\sigma_0 + \sigma_1 h + \sigma_2 h^2 + \sigma_3 h^3 + \sigma_4 h^4)\,(p - p_0),\ (\gamma_0 + \gamma_1 h + \gamma_2 h^2)\, h^\cdot$$

konnten daher durch eine vereinfachte Form

$$\lambda k_1 h \sqrt{p_1 - p_0}\,, \qquad (\sigma_1 h + \sigma_2 h^2)\,(p - p_0),\ \gamma_1 h h^\cdot$$

ersetzt werden. Dies ermöglichte die Einsparung einer Reihe von Multiplizierern.
Bei einem ähnlichen System wurde der Einfluß verschiedener Dämpfungstypen untersucht. In einem Ventil kann außer der viskosen Dämpfung $(\delta h^\cdot)$ noch quadratische Dämpfung $(\varepsilon h^\cdot |h^\cdot|)$ und trockene Reibung $(\varkappa \operatorname{sign} h^\cdot)$ existieren. Die trockene Reibung macht sich besonders bei kleinen Schwingungsamplituden bemerkbar und kann die Breite des Mehrdeutigkeitsgebiets wesentlich beeinflussen. Die quadratische Dämpfung wirkt da-

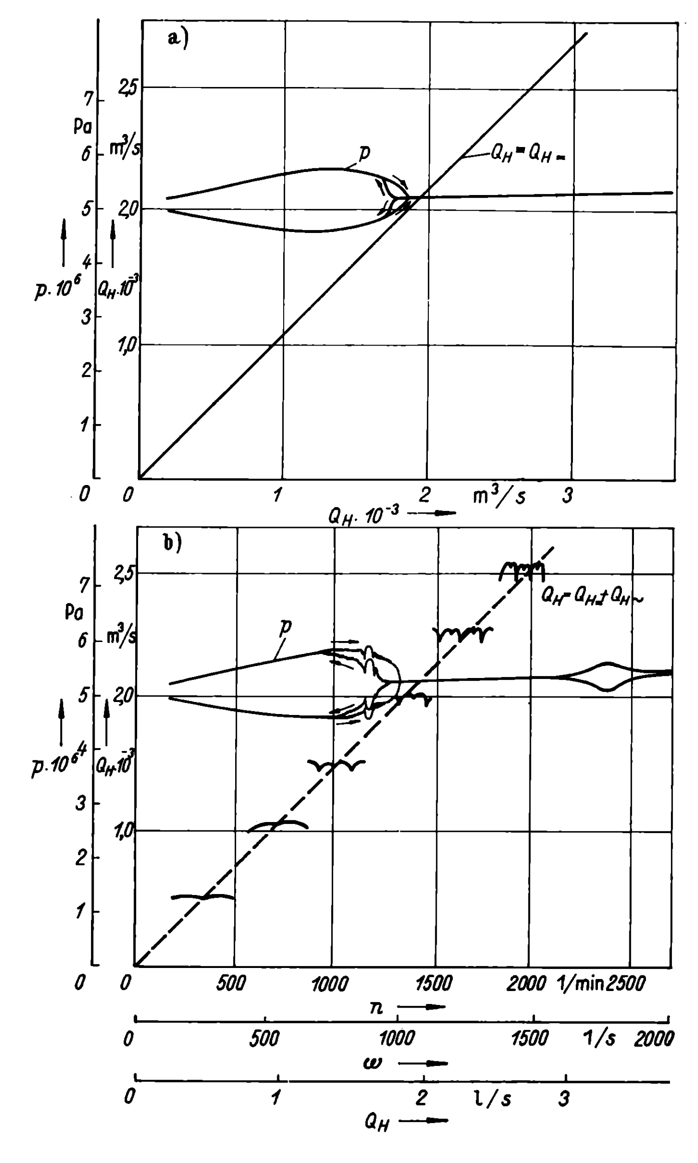


Bild 1. Regelung der Ölmenge Q_H

a) Änderung des Verhältnisses r/l (Kurbelradius/Länge der Kurbelstange)

b) Idealisierter Verlauf von Q_H (ohne periodische Komponente)

gegen meist bei größeren Amplituden und verursacht deren Minderung. Eine unsymmetrische quadratische Dämpfung, die z. B. unterschiedliche Dämpfungsverhältnisse in der Bewegung strömender Flüssigkeit in Hin- und Rückrichtung darstellt, kann leicht modelliert werden. Man kann jedoch weiter beweisen, daß diese Simulation durch einen geometrischen Mittelwert $\varepsilon \sqrt{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}$ befriedigend ersetzt werden kann.

3.2. *Aufzeichnung der Reglerkennlinie $p = f(Q_H)$, $h = f(Q_H)$*

Dies kann leicht durchgeführt werden, indem man die vom Hydrogenerator gelieferte Ölmenge Q_H kontinuierlich ändert. Im Analogrechnerprogramm wird das der Ölmenge entsprechende Potentiometer vom Ausgang eines Integrierers gespeist. Auch in diesem Fall wurden mehrere Parameter systematisch geändert: so wurden z. B. die Kennlinien $p = f(Q_H)$, $h = f(Q_H)$ für je drei Werte von k_2 und σ dargestellt. Der Faktor k_2 drückt die nichtlineare Abhängigkeit zwischen der Auslenkung des Kegels und dem Zuwachs der geöffneten Fläche des Kegelsitzes aus. Eine Erhöhung des Strömungsfaktors σ hat einen ungünstigen Einfluß auf den Verlauf des Druckes zur Folge.

3.3. *Untersuchung periodischer Schwankungen im Hydrogenerator*

Die im Hydrogenerator vorkommenden periodischen Änderungen der Ölmenge können in einem Ventil erzwungene Schwingungen erregen, was auch durch die analoge Simulation nachgewiesen wurde.

Wird der Öldruck durch Drehzahländerung geregelt, ändert sich proportional der statischen Ölmenge auch die periodische Komponente und zugleich auch die Frequenz der Pulsationen. Bei analoger Simulation kann automatisch das Diagramm $p = f(\omega)$ aufgezeichnet werden, das auch als Funktion $p = f(Q_H)$ beschrieben werden kann. Ein Beispiel wird im Bild 1 gegeben. Dieses Bild zeigt die Regelung der Ölmenge Q_H durch Änderung des Verhältnisses r/l (Kurbelradius/Länge der Kurbelstange), was praktisch der Änderung des Winkels in einer Taumelscheibenpumpe entspricht.

Weiter wurde ein Diagramm $p = f(Q_H)$ mit dem idealisierten Verlauf von Q_H (ohne periodische Komponente) registriert (Bild 1b). Ein Vergleich mit Bild 1a zeigt, daß die periodische Komponente nur einen geringen Einfluß hat und daß in diesem Fall praktisch nur selbsterregte Schwingungen vorkommen, die durch kleine Ölmenge verursacht werden.

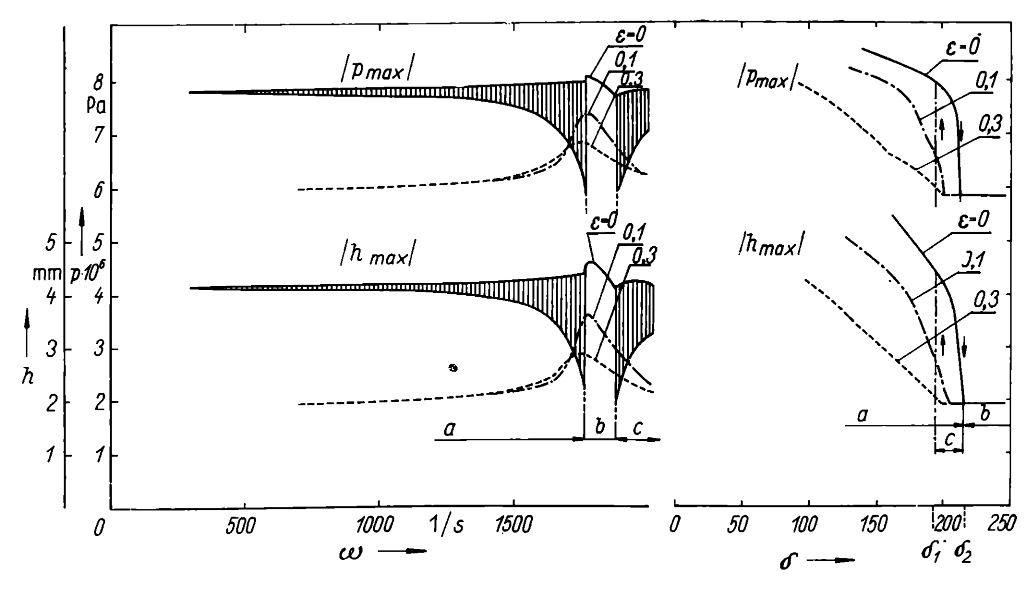


Bild 2. Entstehen von selbsterregten Schwingungen durch Verminderung des Dämpfungsfaktors bewirken Interferenzen

3.4. *Einfluß der periodischen Komponente des Öldrucks in der Abfallrohrleitung*

Die Simulation der Druckschwankungen in der Abfallrohrleitung ist viel einfacher als das Untersuchen periodischer Schwingungen im Hydrogenerator. Der Abfalldruck wird durch den Ausdruck $p_{01} + p_{01}^* \cos \omega t$ beschrieben, und ein harmonisches Signal ist in einem Analogrechner einfach zu simulieren [1].

Bei einem relativ hohen Wert des Dämpfungsfaktors δ können keine selbsterregte Schwingungen vorkommen. In der Nähe der Eigenfrequenz des Systems existiert eine Resonanz, wobei die Amplitude dieser erzwungenen Schwingungen von der Größe der periodischen Komponente p_{01}^* beeinflußt wird. Durch die Änderung des statischen Gegendruckes p_{01} wird die Kennlinie $p = h(\omega)$ nur verschoben, wobei $h = f(\omega)$ praktisch unverändert bleibt.

Wird der Dämpfungsfaktor vermindert, entstehen außer den erzwungenen Schwingungen auch selbsterregte Schwingungen, wodurch in einem breiten Frequenzgebiet die Existenz von Interferenzen verursacht wird (Bild 2). Hier wird zugleich der Einfluß der quadratischen Dämpfung gezeigt. In der Nähe der Eigenfrequenz des Systems werden selbsterregte Schwingungen unterdrückt, und es bleiben nur die erzwungenen Schwingungen, deren Amplitude von der Erregeramplitude und von den Dämpfungsfaktoren δ und ε abhängig ist, übrig. Die zwei Diagramme $p = f(\delta)$, $h = f(\delta)$ im Bild 2 zeigen den Zusammenhang zwischen der Amplitude selbsterregter Schwingungen und den Dämpfungsfaktoren δ und ε.

3.5. *Simulation einer Stoßprüfung*

Diese ermöglicht, den Zeitverlauf des Öldrucks nach einer sprungförmigen Änderung der vom Hydrogenerator gelieferten Ölmenge zu untersuchen und zu optimieren.

Entsprechen die Anfangsbedingungen im simulierten System dem Zustand „vor dem Stoß" und das Eingangssignal Q_H (Ölmenge) dem Zustand „nach dem Stoß", dann wird der Übergangsprozeß berechnet und registriert. Durch die Vorspannung der Feder h_p wird der stationäre Druck geregelt, wobei die Höhe des Überschwingens von mehreren Parametern abhängt. Eine systematische Untersuchung der einzelnen Parameter und die Kombination günstiger Einflüsse kann zur Optimierung des Ventils führen.

So wurden z. B. die Steifigkeit der Feder und der Radius des Kegels geändert, weiterhin wurde für den Kegel ein anderer Werkstoff genommen und die Faktoren δ und α geändert. Die günstigen Einflüsse wurden dann zur besten Variante kombiniert.

Zusammenfassung

Bei Untersuchungen der Stabilität hydraulischer Systeme mit Ventilen wurden mit Erfolg auch elektronische Analogrechner angewandt. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, daß mit diesen Geräten wertvolle Ergebnisse bei kleinem Aufwand erhalten werden können. Die in diesem Beitrag beschriebene Simulation direktwirkender Ventile diente besonders zur gründlichen Vorbereitung der Lösung zweistufiger Ventile, deren Problematik viel komplizierter ist. Auf diesem Gebiet wurden auch erste Versuche durchgeführt.

Literatur

[1] *Giloi, W.; Lauber, R.:* Analogrechnen. Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1963.

msr 6649

Dr.-Ing. *H. Hennig*, Leipzig [1])

Zeit- und Bewegungsverhalten pneumatischer Linearantriebe

IA 4.0.2.2

Verwendete Formelzeichen und Indizes

A	wirksame Kolbenfläche in cm²
a	Rohrleitungsquerschnitt $a = d_{ers} \frac{\pi}{4}$ in cm²
F_{ges}	Gesamtkraft = Gewicht + Reibungskraft + Gegenkraft in N
h	Hub in mm
h_0	schädlicher Raum, dividiert durch die zugehörende wirksame Kolbenfläche in mm
m	zu bewegende Masse in kg
p	absoluter Druck in MPa
p_e	absoluter Eingangsdruck in MPa
p_{at}	absoluter atmosphärischer Druck in MPa
R	Gaskonstante für Luft in Nm/kgK
T	Temperatur in K
T_e	Eingangstemperatur in K
t	Zeit in s
t_1, t_2, t_3	Zeitabschnitte in s
v	Kolbengeschwindigkeit in m/s
w	Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrleitung in m/s
x	Kolbenweg in mm
β	h_0/h
ε	Verhältnis absoluter Drücke
ε_{gr}	Grenzdruckverhältnis
ζ_{ers}	Ersatzwiderstandsziffer, bezogen auf d_{ers} [3] und [7]
ϱ	Dichte der Luft in kg/m³
τ_1, τ_2, τ_3	dimensionslose Zeitparameter, zugeordnet zu t_1, t_2, t_3
$\varkappa$	Adiabatenexponent

Mehrfach verwendete Indizes
1 zum Zylinderraum *1* gehörend
2 zum Zylinderraum *2* gehörend
Angabe der Indizes bei Drücken und Druckverhältnissen
Erster Index: Zylinderraum
Zweiter Index: Kennzeichnung des Zeitabschnitts t_1, t_2 oder t_3

[1]) Mitteilung aus dem VEB Kombinat ORSTA-Hydraulik Leipzig.

Einleitung

Das Zeit- und Bewegungsverhalten pneumatischer Linearantriebe kann wegen seiner Abhängigkeit von vielen Einflußfaktoren sehr unterschiedlich sein. Die für den Projektanten wichtige Vorausbestimmung dieses Verhaltens ist sehr schwierig.

Vereinfachende Berechnungsverfahren führen bei vielen Einsatzbedingungen zu erheblichen Abweichungen von den tatsächlichen Verhältnissen [1] bis [3]. Digital- und Analogrechen-

programme erfordern einen hohen Aufwand an Rechenkapazität, und die Ergebnisse sind oft nicht sofort verfügbar. Ein grafisch-analytisches Verfahren, das erstmals *Gerc* und *Krejnin* entwickelten [4] und [5], ist von der Methodik her für den in der Praxis tätigen Projektanten geeignet, aber in der vorhandenen Form (Eingangsdruck nur 0,4 MPa Überdruck, keine verwendbaren Strömungskenngrößen) nur begrenzt anwendbar.

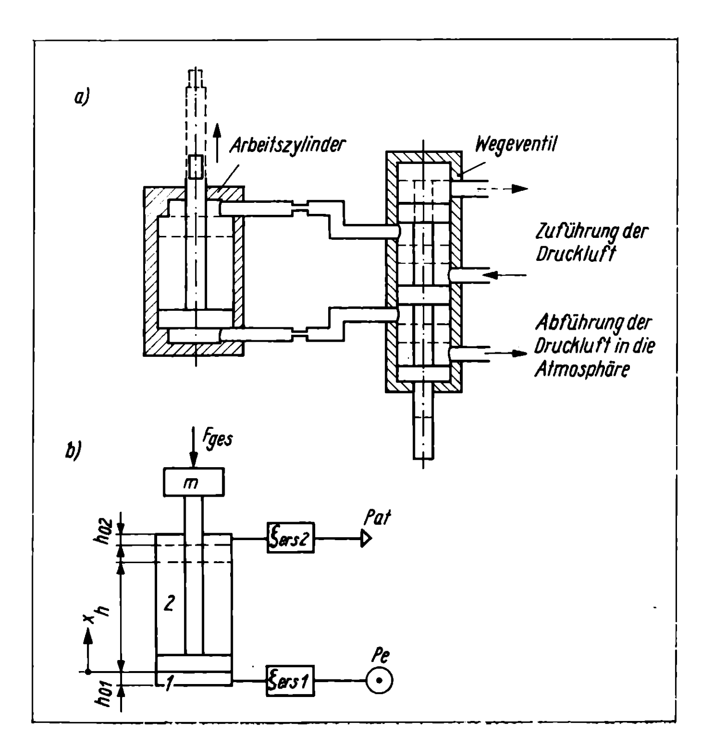
Im Beitrag wird eine Methode zur Ermittlung des Zeit- und Bewegungsverhaltens pneumatischer Linearantriebe bei gleichbleibender Belastung entlang des Hubes vorgestellt, deren Ergebnisse mit experimentell ermittelten in sehr guter Übereinstimmung stehen und die leicht zu handhaben ist. Die Methode beruht auf theoretischen Grundlagen, die rechnerisch ausgewertet in grafischer Darstellung zur Ermittlung der Verhältnisse für konkrete Fälle zur Verfügung stehen. Eine weitere Grundlage der Berechnung sind standardisierte Strömungskennwerte der Pneumatikgeräte und Strömungskennwerte der Rohrleitungen und Verbindungselemente.

1. Allgemeine Beschreibung

Das Zeit- und Bewegungsverhalten wird für einen pneumatischen Linearantrieb nach Bild 1a beschrieben, zur Vereinfachung nur in einer Bewegungsrichtung der Kolbenstange (des Kolbens). Die in das entsprechende Schema nach Bild 1b eingetragenen Zahlen und Buchstaben gelten bei ausfahrender Kolbenstange.

Der Ausfahrvorgang wird eingeleitet, wenn das Wegeventil im Bild 1a umgeschaltet wird. Danach strömt Druckluft in den Zylinderraum *1* und entweicht aus dem Zylinderraum *2* in die Atmosphäre. Der Strömungswiderstand beim Einströmen wird durch die Ersatzwiderstandsziffer $\zeta_{ers\,1}$ repräsentiert, beim Ausströmen durch $\zeta_{ers\,2}$. Die Kolbenstange hat die Masse m (die Eigenmasse ist zu berücksichtigen) zu bewegen. Die Gesamtkraft F_{ges} (Gewicht, Reibungskraft, Gegenkraft) ist der Bewegung entgegengerichtet.

Bild 1. Pneumatischer Linearbetrieb (Arbeitszylinder mit Wegeventil)
a) schematisch, b) symbolisch



Betrachtet man den Verlauf der Luftdrücke in den Zylinderräumen *1* und *2* sowie den des Kolbenhubes, so kann man drei Zeitabschnitte unterscheiden (Bild 2):

– Startverzögerungszeit t_1 [2])

  Der Druck p_2 nimmt ab, der Druck p_1 zu. Die Größe der Startverzögerungszeit hängt wesentlich von der zu Bewegungsbeginn erforderlichen Gesamtkraft ab.

– Bewegungszeit t_2

  Wenn die Kraftdifferenz am Kolben die Gesamtkraft übersteigt, beginnt die Kolbenbewegung. Bei zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit nimmt der Druck p_1 wegen des zunehmenden Druckabfalls in der Zuleitung ab. Der Druck p_2 nimmt ebenfalls weiter ab bis zu dem Wert, der durch den Druckabfall in der Ableitung bedingt ist. Die Bewegung ist je nach Einsatzfall beendet, wenn der Kolben in der Endlage anschlägt, wenn die Brems- oder Spannstellung oder eine technologisch bedingte Grenzlage erreicht ist.

– Wirkverzögerungszeit t_3

  Dieser Zeitabschnitt ist wichtig, wenn in der Nähe des Hubendes eine besondere Wirkung durch die Kolbenkraft zu erreichen ist (Spannkraft, Bremskraft, Kraft für die Abscherung eines Blechteils usw.). Der Druck p_1 steigt relativ langsam an, weil das zu füllende Volumen im allgemeinen groß ist.

  Dagegen nimmt der Druck p_2 schnell ab, da das zu entleerende Volumen im allgemeinen relativ klein ist. Die Größe der Wirkverzögerungszeit hängt deshalb wesentlich von der Größe des erforderlichen Wirkdruckes ab.

Die Ableitung der Gleichungen zur Berechnung des Zeit- und Bewegungsverhaltens pneumatischer Linearantriebe erfolgt im Abschn. 5.

2. Parameter

Aus dem der Berechnung zugrunde liegenden Gleichungssystem ergeben sich Parameter, mit denen das Zeit- und Bewegungsverhalten qualitativ und quantitativ bestimmt werden kann.

– Einströmkennwert $K_1 = \frac{A_1}{a_1} \frac{\sqrt{\zeta_{ers\,1}}}{\sqrt{RT_e}}$

  In der Gleichung ist die Ersatzwiderstandsziffer der Zuleitung enthalten. Sie repräsentiert den Gesamtströmungswiderstand der Rohrstücke, Rohrformstücke und Pneumatikgeräte [6]. Der Wurzelwert $\sqrt{RT_e}$ entspricht der maximal möglichen Strömungsgeschwindigkeit in einer Rohrleitung bei isothermischer Strömung.

T_e	K	233	253	273	293	313	333	253
	°C	−40	−20	0	+20	+40	+60	+80
$\sqrt{RT_e}$	m/s	258	269	280	290	300	309	318

– Ausströmkennzahl $K_2 = \frac{\gamma\psi\lambda}{\alpha}$

  mit $\gamma = a_2/a_1$
  $\psi = \sqrt{\zeta_{ers\,1}/\zeta_{ers\,2}}$
  $\alpha = A_2/A_1$

λ	0,855	0,794	0,757	0,730	0,710
p_{20}	0,30	0,50	0,70	0,90	1,10

[2]) Die Verzögerung vom Eingangssignal am Wegeventil bis zu dessen erfolgter Umschaltung (Schaltzeit) ist in t_1 nicht berücksichtigt.

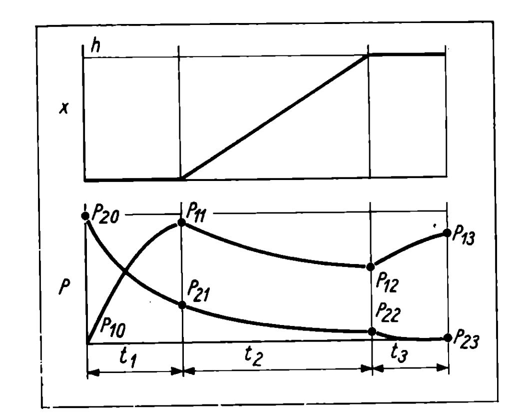


Bild 2. Schematische Darstellung des Verlaufs des Kolbenweges und der Drücke in den Zylinderräumen in Abhängigkeit von der Zeit

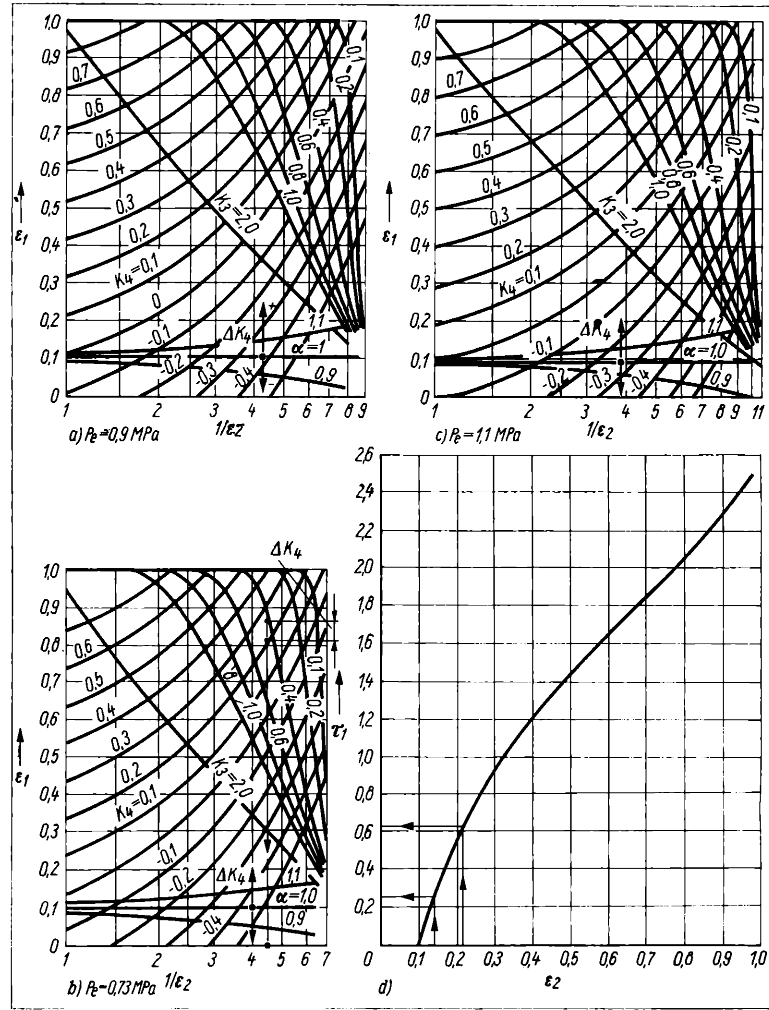




Bild 3. Diagramme zur Bestimmung der Druckverhältnisse zum Bewegungsbeginn

a) $1/\varepsilon_2$ für p_e = 0,9 M Pa; b) $1/\varepsilon_2$ für p_e = 0,73 M Pa,
c) $1/\varepsilon_2$ für p_e = 1,1 M Pa,
d) Diagramm zur Bestimmung des dimensionslosen Zeitparameters τ_1

— Anfangskennzahl $K_3 = \frac{1{,}25\, h_{01}}{h + h_{02}} K_2$

— Belastungskennzahl $K_4 = \frac{F_{\text{ges}}}{A_1 p_e}$

— Trägheitskennzahl $K_5 = \frac{1}{K_1} \sqrt{\frac{m}{A_1 h p_e}}$.

3. Berechnung der Zeitabschnitte

3.1. *Startverzögerungszeit*

$$t_1 = \frac{K_1}{K_2} \frac{h + h_{01}}{1{,}25} [\tau_1(\varepsilon_{21}) - \tau_1(\varepsilon_{20})] .$$

Aus den Bildern 3a bis 3c wird für den zutreffenden Eingangsdruck p_e der Wert $1/\varepsilon_{21}$ aus dem Schnittpunkt der Kennlinien $K_4 + \Delta K_4$ und K_3 ermittelt. Aus Bild 3d gewinnt man für ε_{21} den entsprechenden Wert $\tau_1(\varepsilon_{21})$ bzw. für ε_{20} den Wert $\tau_1(\varepsilon_{20})$.

Beispiel:

$$p_e = 0{,}73 \text{ MPa} \; ; \quad K_4 = 0{,}2 \; ; \quad \alpha = 1{,}1 \; ; \quad K_3 = 0{,}4$$

Aus Bild 3b ermittelt man entsprechend der eingezeichneten Geraden für $1/\varepsilon_{21} = 4{,}5$.
Man errechnet $\varepsilon_{21} = 0{,}222$ und $\varepsilon_{20} = 0{,}137$.
Aus Bild 3d erhält man dann $\tau_1(\varepsilon_{21}) = 0{,}63$ und $\tau_1(\varepsilon_{20}) = 0{,}26$ und damit $t_1 = \frac{K_1}{K_2} \frac{h + h_{01}}{1{,}25} 0{,}37$.

3.2. *Bewegungszeit*

$$t_2 = K_1 h \tau_2$$

Die Werte für τ_2 werden aus einem der Bilder 4a bis 4d für die zutreffende Belastungskennzahl K_4 entnommen.

Bei einer bestimmten Ausströmkennzahl K_2 nimmt τ_2 mit zunehmender Trägheitskennzahl zu. K_5 gewinnt insbesondere bei größeren Ausströmkennzahlen an Einfluß. Bei kleinen Trägheits- und Ausströmkennzahlen (< 0,1) ist die Bewegungszeit von der Trägheitskennzahl nahezu unabhängig.

3.3. *Wirkverzögerungszeit*

$$t_3 = K_1(h + h_{01}) [\tau_3(\varepsilon_{13}) - \tau_3(\varepsilon_{12})]$$

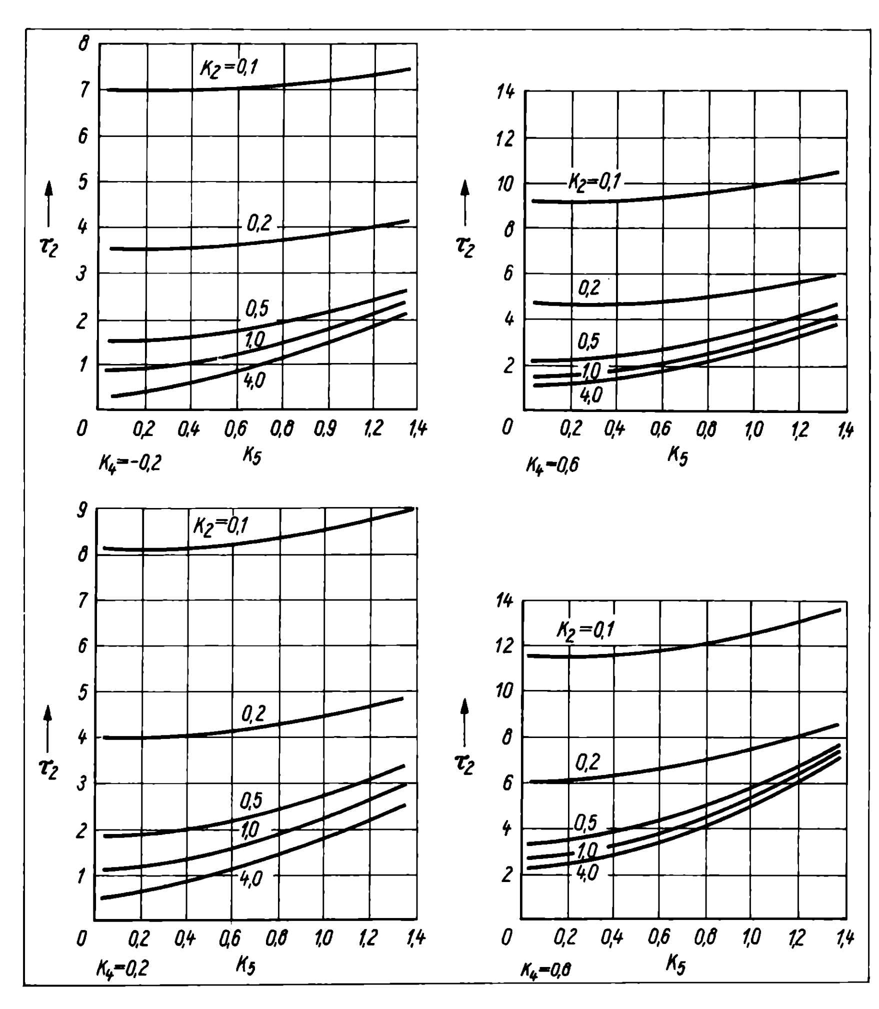
Das Druckverhältnis ε_{13} wird für den erforderlichen Druck p_{13} ermittelt

$$\varepsilon_{13} = p_{13}/p_e \, .$$

Das Druckverhältnis ε_{12} kann näherungsweise aus dem Druckverlust beim Einströmen für die mittlere Kolbengeschwindigkeit bestimmt werden

$$\varepsilon_{12} \approx 1/\sqrt{1 + (1/\tau_2)^2} \, .$$

Diese Näherung ist um so besser, je eher die Endgeschwindigkeit eines Linearantriebes erreicht bzw. je kleiner K_5 ist. Nun können die den Druckverhältnissen entsprechenden Werte τ_3 aus Bild 5 entnommen werden.



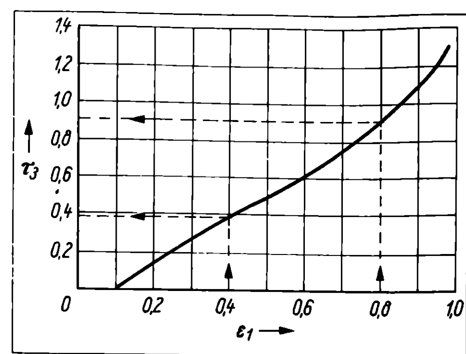


Bild 5. Diagramm zur Bestimmung des dimensionslosen Zeitparameters τ_3

Bild 4. Diagramme zur Bestimmung des dimensionslosen Zeitparameters τ_2

Beispiel: $\varepsilon_{13} = 0{,}8 \quad \tau_3(\varepsilon_{13}) = 0{,}90$

$\varepsilon_{12} = 0{,}4 \quad \tau_3(\varepsilon_{12}) = 0{,}39$

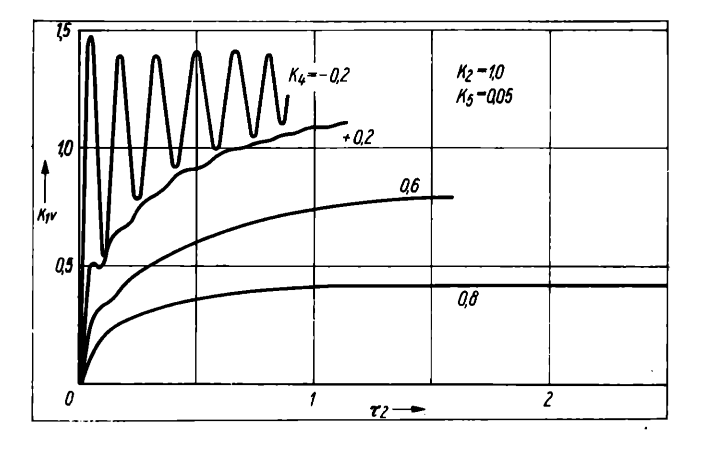
$t_3 = 0{,}51\ K_1(h + h_{01})$

4. Geschwindigkeitsverhalten

Das Geschwindigkeitsverhalten pneumatischer Linearantriebe kann durch die Parameter K_2, K_4 und K_5 beschrieben werden, wenn dazu die dimensionslose Darstellung $K_1 v = f(\tau_2)$ verwendet

Bild 6. Dimensionslose Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes in Abhängigkeit von der Zeit

$K_2 = 1{,}0$; $K_4 = -0{,}2$; $+0{,}2$; $+0{,}6$; $+0{,}8$; $K_5 = 0{,}05$



wird. Die auftretenden Kolbengeschwindigkeiten sind daraus leicht zu ermitteln, wenn man sich vorher einen Überblick über den Bereich der Einströmkennwerte K_1 verschafft.

Bild 6 zeigt das Geschwindigkeitsverhalten für einen Linearantrieb mit relativ geringer Trägheit ($K_5 = 0{,}05$). Die Kennlinien für die verschiedenen Belastungskennzahlen zeigen: Je größer die Belastung ist, um so kleiner sind die Geschwindigkeitsschwankungen und Geschwindigkeiten.

Gegenüber den Kennlinien im Bild 6 wurde für Bild 7 die Trägheit verzehnfacht. Die Frequenz der Geschwindigkeitsschwankungen wird so klein, daß keine vollständige Schwingung bis zum Hubende zustande kommt.

Bild 8 zeigt für eine Belastung von $K_4 = 0{,}6$ den Geschwindigkeitsverlauf für verschiedene Ausströmkennzahlen eines Linearantriebes relativ kleiner Trägheit. Wie man erwarten kann, ist die Geschwindigkeit bei kleinen Ausströmkennzahlen kleiner, aber gleichzeitig damit werden auch die Geschwindigkeitsschwankungen zunehmend gedämpft. Wird unter sonst gleichen Bedingungen die Trägheit verzehnfacht, so wird wieder die kleinere Schwankungsfrequenz sichtbar (Bild 9).

Im Bild 10 wird das Geschwindigkeitsverhalten von drei Linearantriebsgruppen verglichen, deren Ausströmkennzahl relativ klein und deren Belastung relativ groß ist.

Nur ihre Trägheiten sind verschieden. Man erkennt, daß die Dämpfung der Geschwindigkeitsschwankungen mit zunehmender Trägheit geringer wird. Bei $K_5 = 0{,}2$ ist bereits nach zwei Schwingungen die stationäre Geschwindigkeit erreicht, bei $K_5 = 0{,}5$ noch nicht.

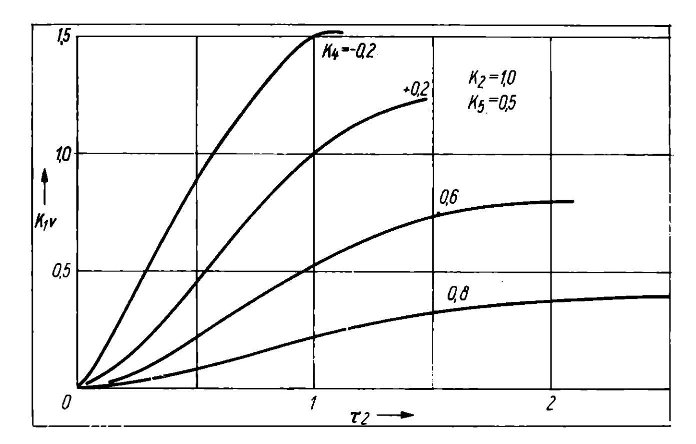


Bild 7. Dimensionslose Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes in Abhängigkeit von der Zeit

$K_2 = 1{,}0$; $K_4 = -0{,}2$; $+0{,}2$; $+0{,}6$; $+0{,}8$; $K_5 = 0{,}5$

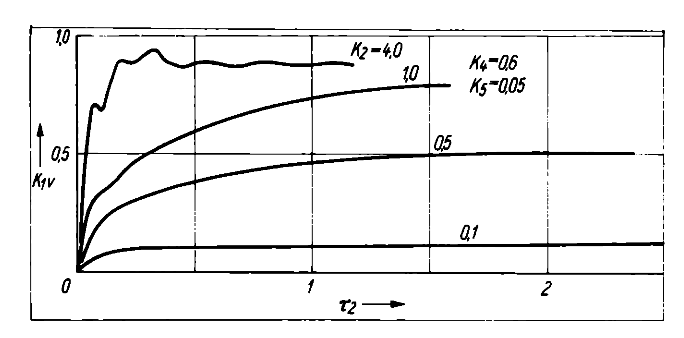


Bild 8. Dimensionslose Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes in Abhängigkeit von der Zeit

$K_2 = 4{,}0$; $1{,}0$; $0{,}5$; $0{,}1$; $K_4 = 0{,}6$; $K_5 = 0{,}05$

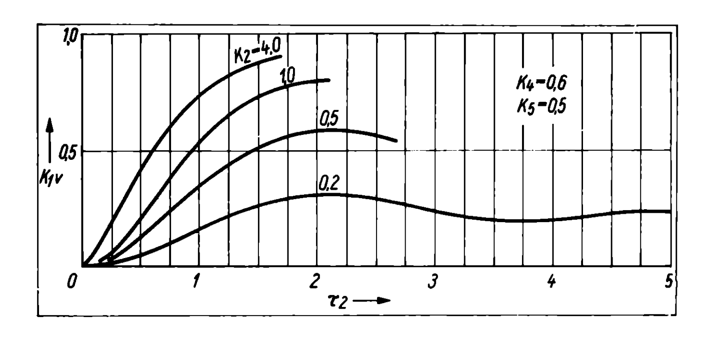


Bild 9. Dimensionslose Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes in Abhängigkeit von der Zeit

$K_2 = 4{,}0$; $1{,}0$; $0{,}5$; $0{,}2$; $K_4 = 0{,}6$; $K_5 = 0{,}5$

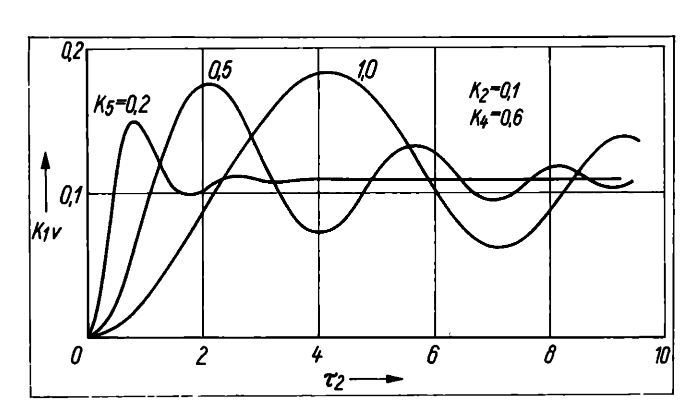


Bild 10. Dimensionslose Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes in Abhängigkeit von der Zeit

$K_2 = 0{,}1$; $K_4 = 0{,}6$; $K_5 = 0{,}2$; $0{,}5$; $1{,}0$

5. Mathematische Beziehungen

5.1. *Bewegungsgleichung des belasteten Arbeitszylinders*

$$m\ddot{x} + F_{\text{ges}} + p_2A_2 = p_1A_1$$

Mit den Abkürzungen

$$\xi = \frac{x}{h}; \quad \varepsilon = \frac{p_{\text{at}}}{p_{\text{e}}}; \quad \tau_2 = \frac{t}{t_{\text{m}}} K_5;$$

$$\varepsilon_1 = \frac{p_1}{p_{\text{e}}}; \quad K_4 = \frac{F_{\text{ges}}}{p_{\text{e}}A_1}; \quad \varepsilon_2 = \frac{p_{\text{at}}}{p_2}$$

schreibt sich die Bewegungsgleichung

$$\ddot{x}\frac{m}{p_{\text{e}}A_1} = \varepsilon_1 - \frac{\alpha\varepsilon}{\varepsilon_2} - K_4 .$$

Bildet man

$$\dot{x} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = h\frac{K_5}{t_{\text{m}}}\frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}\tau_2},$$

$$\ddot{x} = \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = h\frac{K_5^2}{t_{\text{m}}^2}\frac{\mathrm{d}^2\xi}{\mathrm{d}\tau_2^2},$$

so erhält man schließlich

$$\frac{\mathrm{d}^2\xi}{\mathrm{d}\tau_2^2} = \frac{1}{K_5^2}\left(\varepsilon_1 - \frac{\alpha\varepsilon}{\varepsilon_2} - K_4\right) \tag{1}$$

mit $t_{\text{m}} = \sqrt{\dfrac{mh}{p_{\text{e}}A_1}}$.

K_5 ist eine noch zu bestimmende Konstante.

5.2. *Gleichung für die Druckänderung im Zylinderraum 1*

Die Zustandsänderungen sind [7]:

- in der Rohrleitung isothermisch
- im Zylinderraum bis zum Bewegungsbeginn isothermisch, während der Kolbenbewegung adiabatisch.

Die in den Zylinderraum in der Zeiteinheit strömende Masse ist

$$\dot{m}_1 = \varrho_{\text{e}}a_1w_1\varepsilon_1$$

$$w_1 = \sqrt{\frac{(1 - \varepsilon_1^2)\,RT_{\text{e}}}{\varepsilon_1^2(\zeta_{\text{ers}\,1} - 1{,}05 \ln \varepsilon_1^2)}} .$$

Damit ist

$$\dot{m}_1 = \varrho_{\text{e}}a_1\sqrt{RT_{\text{e}}}\begin{cases}\sqrt{\dfrac{1 - \varepsilon_1^2}{\zeta_{\text{ers}\,1} - 1{,}05 \ln \varepsilon_1^2}} & \text{für } \varepsilon_1 \geqq \varepsilon_{1\,\text{gr}} \\ \varepsilon_1 & \text{für } \varepsilon_1 < \varepsilon_{1\,\text{gr}}\end{cases} \tag{2}$$

Nach Beginn der Kolbenbewegung gilt

$$\frac{p_1}{\varrho_1} = \frac{p_{11}}{\varrho_{11}} = \frac{p_{11}}{(\varepsilon_{11}\varrho_{\text{e}})^{\varkappa}},$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{11}^{1-\varkappa}}{(A_1\varrho_{\text{e}}h)^{\varkappa}}\left(\frac{m_1}{\beta_1 + \xi}\right)^{\varkappa}.$$

Nach m_1 aufgelöst und differenziert ist

$$\dot{m}_1 = A_1\varrho_{\text{e}}h\varepsilon_{11}^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}\left[(\beta_1 + \xi)\frac{1}{\varkappa}\varepsilon_1^{\frac{1-\varkappa}{\varkappa}}\dot{\varepsilon}_1 + \varepsilon_1^{\frac{1}{\varkappa}}\dot{\xi}\right]. \tag{3}$$

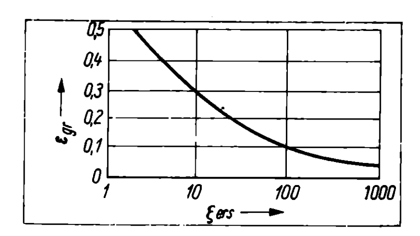


Bild 11. Grenzdruckverhältnisse in Abhängigkeit von der Ersatzwiderstandsziffer der Rohrleitung

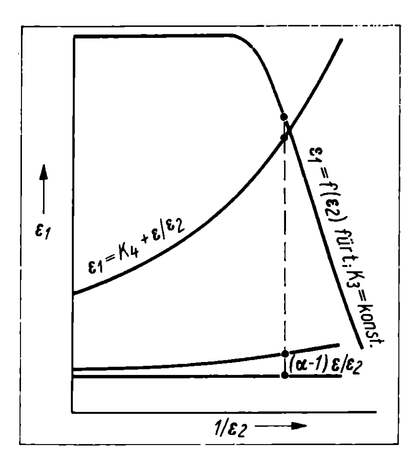


Bild 12. Bildungsgesetz der Diagramme der Bilder 3a bis 3c

Setzt man die Gln. (2) und (3) gleich, so folgt

$$\frac{d\varepsilon_1}{d\tau_2} = \frac{\varkappa}{\beta_1 + \xi}\left[\varepsilon_{11}^{\frac{1-\varkappa}{\varkappa}}\,\varphi_1(\varepsilon_1, \zeta_{ers\,1}) - \varepsilon_1 \frac{d\xi}{d\tau_2}\right] \tag{4}$$

mit

$$\varphi_1(\varepsilon_1, \zeta_{ers\,1}) = \varepsilon_1^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}\sqrt{\zeta_{ers\,1}}\begin{cases}\sqrt{\dfrac{1-\varepsilon_1^2}{\zeta_{ers\,1} - 1{,}05\ln\varepsilon_1^2}} & \text{für } \varepsilon_1 \geqq \varepsilon_{1gr}\\ \varepsilon_1 & \text{für } \varepsilon_1 < \varepsilon_{1gr}\end{cases}$$

Bei der Ableitung dieser Gleichung erhält man für K_5 den im Abschn. 2 angegebenen Ausdruck.

5.3. *Gleichung für die Druckänderung im Zylinderraum 2*

Die Zustandsänderungen sind [7]:

- im Zylinderraum adiabatisch
- in der Rohrleitung isothermisch.

Die aus dem Zylinderraum in der Zeiteinheit strömende Masse ist

$$\dot{m}_2 = -\varrho_2 a_2 w_2$$

$$w_2 = \sqrt{\frac{(1-\varepsilon_2^2)\,RT_2}{\zeta_{ers\,2} - 1{,}05\ln\varepsilon_2^2}}\,.$$

Auf analoge Weise wie für Zylinderraum 1 unter Berücksichtigung der adiabatischen Entspannung erhält man

$$\frac{d\varepsilon_2}{d\tau_2} = \frac{\varkappa}{1 + \beta_2 - \xi}\left[K_2\varphi_2(\varepsilon_2, \xi_{ers\,2}) - \varepsilon_2 \frac{d\xi}{d\tau_2}\right] \tag{5}$$

mit

$$\varphi_2(\varepsilon_2, \zeta_{ers\,2}) =$$

$$= \varepsilon_2^{\frac{\varkappa+1}{2\varkappa}}\sqrt{\zeta_{ers\,2}}\begin{cases}\sqrt{\dfrac{1-\varepsilon_2^2}{\zeta_{ers\,2} - 1{,}05\ln\varepsilon_2^2}} & \text{für } \varepsilon_2 \geqq \varepsilon_{2gr}.\\ \varepsilon_{2gr} & \text{für } \varepsilon_2 < \varepsilon_{2gr}\end{cases}$$

5.4. *Grenzdruckverhältnis*

Beim Grenzdruckverhältnis (Bild 11) wird am Ende der Rohrleitungsstrecke die maximal mögliche Strömungsgeschwindigkeit erreicht. Bei kleineren Druckverhältnissen kann die Strömungsgeschwindigkeit nicht weiter gesteigert werden.

5.5. *Diagramm zur Bestimmung der Startverzögerungszeit*

Zur Bestimmung der Startverzögerungszeit wird der Schnittpunkt der Kennlinie für das Druckverhältnis ε_1 bis zum Bewegungsbeginn aus Gl. (1) und der Kennlinie $\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2)$ für t = konst. verwendet (Bild 12).

Zusammenfassung

Es wird gezeigt, daß die Berechnung der Zeitabschnitte und das Bewegungsverhalten durch wenige Kennzahlen vollständig beschrieben werden kann, obwohl die Grundlage ein unübersichtliches und vielfach nichtlineares Differentialgleichungssystem [Gln. (1), (4) und (5)] ist. Für den Projektanten sind fertige Rechenergebnisse enthalten, die über eine einfache Berechnung weniger Kennzahlen verwendet werden können. Wesentlich ist dabei, daß durch die Angabe der Strömungskennwerte ζ in Standards der Pneumatikgeräte eine wichtige Voraussetzung für diese Berechnungsart gegeben ist. Es ist für den Projektanten sicher ein leichtes, für Zwischenwerte, die sich bei konkreten Berechnungen ergeben, in den Diagrammen der Bilder 3a bis 3c und 4a bis 4d zu interpolieren.

Die vorliegenden Rechenergebnisse gelten exakt nur für konstante Gegenkräfte, die in der Praxis überwiegen. Aber auch für andere Belastungsfälle kann man mit diesen Ergebnissen die Größenordnung der Kolbengeschwindigkeit und das qualitative Verhalten abschätzen. Die abgeleiteten Gleichungen im Abschn. 5 können auch verwendet werden, wenn sich die Gesamtkraft in Abhängigkeit vom Kolbenweg ändert.

Literatur

[1] *Berdnikov, V. V.*: Opredelenie vremeni srabativanija poršnej pnevmatičeskih privodov metallorežuščih stankov (Bestimmung der Hubzeit der Arbeitszylinder in pneumatischen Antrieben spanabhebender Werkzeugmaschinen). Stanki i instrument **26** (1955) H. 11, S. 1 – 7.

[2] *Dimitriev, V. N.*; *Černyšev, V. I.*: Grafoanaliticeskij metod raščeta ustanovivsejsja skorosti pnevmoprivoda (Grafisch-analytische Methode der Berechnung der stationären Geschwindigkeit pneumatischer Antriebe). Avtomatika i telemechanika **10** (1959) S. 1366 – 1373.

[3] *Hennig, H.*: Geschwindigkeitssteuerungen penumatischer Arbeitszylinder. Technischer Informationsdienst ORSTA-Hydraulik **5** (1966) H. 3, S. 84 – 93.

[4] *Gerc, E. V.*; *Krejnin, G. V.*: Teorija i radcet silovyh pnevmatičeskih ustrojstf (Theorie und Berechnung pneumatischer Antriebe). Moskau: Verlag der Akademie der Wissenschaften der UdSSR 1960.

[5] *Hochstrate, H.*; *Ziegert, Ch.*: Berechnung der Zeitabschnitte der Kolbenbewegung pneumatischer Arbeitszylinder. Technischer Informationsdienst ORSTA-Hydraulik **9** (1970) H. 1, S. 536 – 544.

[6] *Hennig, H.*: Bestimmung der Druckabfälle in Pneumatikanlagen. Technischer Informationsdienst ORSTA-Hydraulik **5** (1966) H. 2, S. 57 – 60.

[7] *Hennig, H.*: Warum vereisen Pneumatikanlagen? msr **20** (1977) H. 6, S. 335 – 338.

msr 6803

Doz. Dr.-Ing. habil. *J. Ober*, Gliwice/VR Polen[1])

Anwendung der Entropie bei der Prozeßanalyse von wärmetechnischen Ausrüstungen

IA 1.1.3

Einleitung

Die Energiebilanz bildet die Grundlage für die Durchführung der theoretischen Prozeßanalyse. Als thermodynamische Zustandsvariable wird meistens die Enthalpie benutzt. Die Energiebilanzgleichung nimmt dabei einen recht komplizierten Ausdruck an und ist sehr stark über den Druck mit den Massenbilanz- und Impulsgleichungen verflochten, was eine explizite Lösung der einzelnen Gleichungen und ihre mathematische Behandlung erschwert.

Bei der Anwendung der Entropie als Zustandsvariable geht die Energiebilanz in die Bilanz der Entropie über. Die Bilanzgleichung der Entropie besteht aus den Summanden — Entropieströmung und Entropieerzeugung. Die Entropieströmung beinhaltet die Änderung der Entropie infolge der Wärme- und Massenströme zwischen dem betrachteten Element und der Umgebung. Der zweite Summand — Entropieerzeugung — deutet auf irreversible Prozesse hin, die sich im Innern des Elements abspielen (z. B. Reibung usw.). Die auf dieser Basis aufgebaute Entropiebilanz bietet eine plausible Form der Gleichung, die von der Massenbilanz- und Impulsgleichung vollständig getrennt werden kann. Die Entropie als Zustandsvariable wird seit 1969 erfolgreich genutzt [1] bis [4].

1. Theoretische Grundlagen

Allgemein wird die Energiebilanz von der bekannten Differentialgleichung aus der Thermodynamik abgeleitet

$$\mathrm{d}q = \mathrm{d}i - v\,\mathrm{d}p\,. \tag{1}$$

Der Ausdruck wird durch ein unvollständiges Integral beschrieben (Bild 1). Das bedeutet, daß für die Beschreibung des Vorganges eine zusätzliche Zustandsvariable notwendig ist.

Dagegen ist die behandelte thermodynamische Gleichung

$$T\,\mathrm{d}s = \mathrm{d}q \tag{2}$$

ein vollständiges Differential. Die Entropiebilanzgleichung, bezogen auf ein Volumenelement, lautet

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\mathrm{div}\,\boldsymbol{I}_s + g(s)\,. \tag{3}$$

Der Vektor $\boldsymbol{I}_s$ gibt die lokale Geschwindigkeitszunahme der Entropiedichte an, die sich auf den Wärme- und Stoffaustausch des betrachteten Volumenelements mit der Umgebung bezieht. ($\boldsymbol{I}_s$) wird als Entropieströmung bezeichnet, und $g(s)$ ist die lokale Entropieerzeugung als Folge der sich im Innern des Elements abspielenden irreversiblen Prozesse (z. B. innere Reibung)

$g(s) = 0$ reversibler Ablauf des Prozesses

$g(s) > 0$ irreversibler Ablauf

$g(s) < 0$ unmöglicher Vorgang.

Für unbekannte Prozesse und in der Phase der Einarbeitung in diese Darstellungsform kann die Bestimmung von $g(s)$ aus den Enthalpieverlusten unter Zuhilfenahme von is-Diagrammen erfolgen.

2. Beispiele für die Systembeschreibung durch die Enthalpie im Vergleich zur Entropie

Die Beschreibungsgleichungen einer Rohrströmung bei gleichzeitiger Wärmezufuhr lauten mit den jeweiligen Zustandsvariablen

$$\varrho\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(i + \frac{U^2}{2}\right) - \frac{\partial p}{\partial t} = k\dot{q} \tag{4}$$

$$T\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = K_1\dot{q} + K_2\zeta\cdot u^2\,. \tag{5}$$

ϱ Dichte; i Enthalpie; s Entropie; p Druck; u Geschwindigkeit; T Temperatur; K, K_1, K_2 Konstanten

Im Vergleich zur Enthalpiebilanz hat die Entropiebilanz eine einfachere Form und ist nicht über den Druck mit den anderen Beschreibungsgleichungen verbunden. Diese Tatsache ermöglicht eine unkomplizierte mathematische Behandlung ohne die Vereinfachung, daß $\mathrm{d}p/\mathrm{d}t = 0$ ist, die meistens bei der Lösung der Gleichungen mit der Enthalpie vorgenommen wird.

Diese Vereinfachung kann zu einem großen Fehler bei der Prozeßbeschreibung führen und soll am Beispiel des Entleerungsvorganges eines Behälters erläutert werden.

Bild 2 zeigt einen Behälter, der sich durch eine Öffnung in die Atmosphäre entleert. Das zugehörige is-Diagramm für drei theoretische Beschreibungsmöglichkeiten ist ebenfalls dargestellt. Bei der Vereinfachung $\mathrm{d}p/\mathrm{d}t = 0$ lauten die Energie- und Massenbilanz bei der Verwendung der Enthalpie

$$\frac{\mathrm{d}(V\varrho i)}{\mathrm{d}t} = -\dot{m}_\mathrm{m} i_\mathrm{m} \quad \text{und} \quad \frac{\mathrm{d}(V\varrho)}{\mathrm{d}t} = -\dot{m}_\mathrm{m}\,, \tag{6}$$

was einen isoenthalpischen Verlauf im is-Diagramm vom Punkt *1* zum Punkt *2* bedeutet. Da die Austrittsgeschwindigkeit $W_\mathrm{m} = K\sqrt{\Delta i}$ eine Funktion von Δi ist, ist diese Größe mit einem großen Fehler behaftet. Bei der Entropiebilanz lautet die Gleichung

$$\frac{\mathrm{d}(V\varrho s)}{\mathrm{d}t} = -\dot{m}_\mathrm{w} s_\mathrm{w}\,. \tag{7}$$

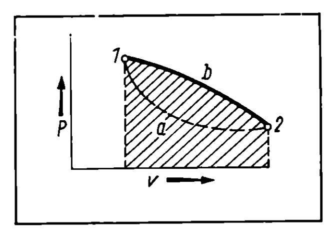


Bild 1. Grafische Darstellung im pv-Diagramm

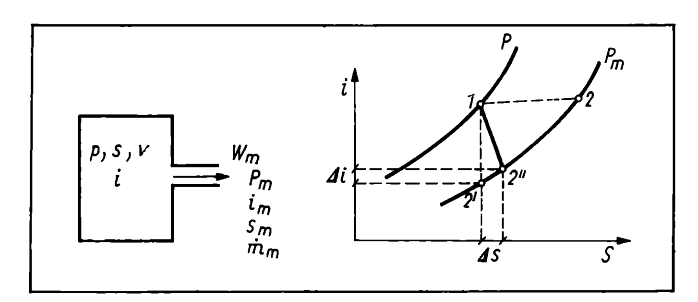


Bild 2. Entleerungsvorgang eines Behälters mit dazugehörigem is-Diagramm

[1]) Mitteilung aus dem Institut für Elektroenergie und Steuerungstechnik im Polytechnikum Gliwice/VR Polen.

Der Vorgang verläuft jetzt isoentropisch vom Punkt *1* zum Punkt *2'*. Der wirkliche Verlauf des Vorgangs führt zum Punkt *2''*. Der entstehende Fehler der Austrittsgeschwindigkeit ist vernachlässigbar klein. Der Zuwachs der Entropie Δs beim wirklichen Vorgang findet auf Kosten des Enthalpieverlustes Δi statt.

Zusammenfassung

Die Anwendung der Entropie als Zustandsvariable bietet einfachere Gleichungen und damit eine unkompliziertere mathematische Behandlung. Da die Entropiebilanzgleichung nicht über Druck mit anderen Beschreibungsgleichungen gekoppelt ist, braucht man keine Vereinfachung $dp/dt = 0$ vorzunehmen, die bei der Enthalpiebenutzung zu Beschreibungsfehlern führen kann. Die Entropie erlaubt gleichzeitig die Durchführung von theoretischen Untersuchungen der thermodynamischen Güte des Prozesses.

Literatur

[1] *Ober, J.*: Beitrag zur Systembeschreibung von Kreisläufen in Kernkraftwerken. Dissertation, „Otto von Guericke" TH Magdeburg 1971.

[2] *Ober, J.*: Numerische Methode der dynamischen Systembeschreibung von wärmetechnischen Teilen des Kraftwerksblockes. Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Gliwice (1973).

[3] Departement Mecanique Theorique. Electricite de France. Arbeitsbericht, Mai 1967.

[4] *Clauseau, R.*: Representation of Thermal Power Stations by Models and Operating Studies. V. IFAC-Kongreß Paris 1972.

msr 6625

Dr.-Ing. *J. Ester*, Karl-Marx-Stadt[1])

Optimierung linearer mehrdimensionaler Regelkreise bei hohen Genauigkeitsforderungen mit Hilfe eines Dialogverfahrens Mensch — Kompromißmenge

IA 1.1.2; 2.1

1. Ziel des Verfahrens

Die Notwendigkeit der Automatisierung Großer Systeme ist mit einer Reihe von Entwurfsproblemen verbunden. Eine i. allg. anerkannte und benutzte Entwurfsstrategie besteht in der Aufteilung des Problems in eine statische und in eine dynamische Optimierung. Aufgabe der statischen Optimierung ist die Bestimmung optimaler Arbeitspunkte der einzelnen Systemglieder, während es Aufgabe der dynamischen Optimierung ist, entweder optimale Steuerstrategien für den Übergang von einem Arbeitsregime zum anderen zu finden oder die Stabilität eines Arbeitsregimes zu gewährleisten [1] und [16]. Für die Lösung der zuletzt genannten Aufgabe hat sich das Prinzip der Rückführung bewährt und durchgesetzt. Durch die wachsende Komplexität und Kompliziertheit der zu automatisierenden Systeme haben die so entstehenden Regelungsaufgaben eine immer höhere Dimension. Dieser Fakt sowie auch die wachsenden Güteforderungen erschweren immer mehr die Lösung der Entwurfsaufgabe. Auf der anderen Seite ist dieser Prozeß aber auch mit einer wachsenden Leistungsfähigkeit der Gerätetechnik im weitesten Sinne — also auch der Rechentechnik — verbunden. Dem kommt noch entgegen, daß durch die Modellbildung gleichfalls immer bessere und auch praktischere Methoden zur Verfügung gestellt werden. Damit sind die Grundlagen dafür gegeben, daß die wichtigsten Entwurfsziele für solche Regelkreise:

- Stabilität
- Störgrößenbekämpfung
- gutes Führungsverhalten

durch geeignete Entwurfsverfahren erreicht werden.

Schon die Aufzählung all dieser Ziele macht deutlich, daß es sich, wie i. allg. bei jedem Entwurfsproblem, um eine polyoptimale Aufgabenstellung handelt, die ihre Lösung in der Kompromißmenge der Einzelziele findet [2].

Die besonders in den Arbeiten [2] [7] und [10] nachgewiesene methodische Unzulänglichkeit der Festlegung der Kompromißlösung ohne ausreichende Kenntnis der Kompromißmenge — z. B. durch die Vorgabe von Gewichtsfaktoren für eine positive Linearkombination der Einzelkriterien — ist eigentlich allen bisher zur Lösung dieses Entwurfsproblems bekannten Verfahren eigen.

In vielen Fällen ist es aber durch eine Modifizierung dieser Lösungsverfahren möglich, einen Dialog zwischen dem Entwurfsingenieur und einer entsprechenden Kompromißmenge aufzubauen. Der Begriff „Dialogverfahren" ist dabei im Sinne der Arbeiten [2] und [10] zu verstehen. Allerdings verlangt die praktische Realisierung solcher Zwiegespräche einen erheblichen Aufwand an elektronischer Rechentechnik.

Ziel der Arbeit ist die Weiterentwicklung bekannter Entwurfsverfahren zu Dialogverfahren, die Bestimmung der Einsatzgebiete und der Grenzen, wobei im folgenden nur die Grundgedanken ohne rechnerischen Teil dargelegt werden sollen.

2. Überblick über Lösungsverfahren

Ein sehr guter Überblick über Lösungswege und -verfahren ist in [1] zu finden. Hier soll lediglich auf die bekanntesten eingegangen werden, wobei insbesondere ihre Eignung zum Aufbau eines Dialogprozesses interessiert. Sieht man von der weitverbreiteten Methode des empirischen Experimentierens am Objekt oder am Modell ab, die ja ein Dialogverfahren im weitesten Sinne darstellt, bleibt der Entwurf mit Hilfe von Einstellregeln, Hilfskriterien (Betragsoptimum, Polverschiebung usw.) und unter Verwendung von — i. allg. analytisch formulierbaren — Gütefunktionen. Ein echter qualitativer und quantitativer Vergleich der Ergebnisse eines Entwurfes kann im Sinne der Polyoptimierung nur über die Werte von Gütefunktionen geschehen. Daraus folgt, daß für ein Dialogverfahren nur solche Methoden in Frage kommen, die mit Gütekriterien arbeiten. Solche Gütekriterien können sein: quadratische Abweichungen, lineare Abweichungen, ITAE-Kriterien, Überschwingweiten, Ausregelzeiten usw. Die zur Minimierung dieser Kriterien angewendeten Verfahren

---

[1]) Mitteilung aus der TH Karl-Marx-Stadt, Sektion Automatisierungstechnik.

Der Beitrag entstand während der Tätigkeit des Autors im Internationalen Wissenschaftlerkollektiv am IPU Moskau.

arbeiten entweder im Zeit- oder Frequenzbereich. Sie sind abhängig von der Wahl der Eingangsgrößen und natürlich davon, ob das System linear oder nichtlinear ist. Die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten führt zu einer beträchtlichen Aufwandserhöhung, was z. B. in [15] deutlich wird. Deswegen erfordert die Optimierung von nichtlinearen Systemen meist die Entwicklung eines für das entsprechende System spezifischen Verfahrens. Im Gegensatz dazu stellen die Wienersche Optimalfiltertheorie, die Theorie der linearen Optimalsteuerung und die Ausnutzung des Parsevalschen Integrals für lineare Systeme gut ausgearbeitete, allgemeine Lösungsverfahren zur Verfügung, die teilweise auch ohne Simulationsläufe arbeiten.

3. Quadratische Abweichung als universelles Gütekriterium

Mit quadratischen Abweichungen lassen sich sämtliche im Abschn. 1 genannten Entwurfsziele erfassen. Ihre Optimierung ist theoretisch am weitesten erforscht. Es existieren für viele Fälle schon vollständig ausgearbeitete Lösungsalgorithmen und bekannte notwendige Bedingungen für ihre Extrema [1] [3] und [6]. Dies gilt insbesondere für die Wienersche Optimalfiltertheorie, für die Theorie der linearen Optimalsteuerung und für die Ausnutzung des Parsevalschen Integrals. In den bisherigen Arbeiten wird dabei das Problem mehrerer Gütefunktionen durch die Vorgabe von Gewichtsfaktoren und ihrer Zusammenfassung zu einer globalen Gütefunktion umgangen. Wie in den Arbeiten [2] [7] und [10] aber nachgewiesen wurde, vergibt sich der Entwurfsingenieur durch diese Vorgehensweise die Möglichkeit, die echten Potenzen seines Systems zu untersuchen, denn die Topologie der Kompromißmenge, die vom vorgegebenen Problem abhängt, beeinflußt sehr stark die Lage der gefundenen Lösung.

Einen Ausweg aus diesem Dilemma stellt die Verwendung eines Dialogverfahrens dar, das es dem Entscheidungsträger (Entwurfsingenieur) gestattet, gezielt in der Kompromißmenge solange „spazierenzugehen", bis der Punkt erreicht ist, der den Lösungsvorstellungen des Entscheidungsträgers entspricht. Gemäß der in [10] dargestellten Weise bestimmt dabei der Entscheidungsträger die Richtung des nächsten Schrittes und erhält bei jedem Schritt dessen Ergebnis in Form der ihn interessierenden Werte der Gütefunktionen. Für diesen Prozeß ist es natürlich vorteilhaft, wenn die entsprechenden notwendigen Bedingungen bekannt sind. Das ist, wie schon oben angeführt wurde, bei der Verwendung quadratischer Abweichungen als Gütekriterien linearer Systeme gewährleistet.

Aus diesem Grund scheint die Ausnutzung dieser Güteintegrale vorteilhaft. Besonders augenscheinlich wird dies dann, wenn die verwendeten Eingangsfunktionen von einfacher, überschaubarer Art sind. Entsprechend dem bewährten Konzept der klassischen Regelungstechnik bieten sich Eingangssprungfunktionen an. Sie stellen einen wichtigen Extremfall auf Grund der sprungartigen Beaufschlagung des Systems mit nichtverschwindenden Einwirkungen dar. Außerdem sind zusätzliche Signaluntersuchungen nicht notwendig [3] und [4].

Neben den Verfahren der charakteristischen Ortskurven, der kommutativen und dyadischen Regelung ist das Konzept für Entkopplungs- und Hauptregler weit verbreitet. Damit wird die Grundstruktur eines Regelkreises festgelegt, und es entsteht das Problem der Dimensionierung der eindimensionalen Hauptregelkreise. Natürlich ist es auch möglich, auf die Entkopplung zu verzichten und eine feste Rückführstruktur einfach festzulegen. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise hängt sehr stark von der Erfahrung und vom Fingerspitzengefühl des Projektanten ab. Auch hier entsteht nach der Vorgabe der Struktur das Problem der Dimensionierung der Reglerparameter [14]. Für die Festlegung der Struktur eines störausregelnden Folgereglers ist es unbedingt notwendig, integral wirkende Regleranteile zu berücksichtigen, da nur diese innerhalb einer Rückführstruktur eine bleibende Regelabweichung beseitigen können [13]. Wenn die Struktur der Rückführung festgelegt ist, können mit Hilfe der Laplace-Transformation und der Parsevalschen Formeln die einzelnen Gütefunktionen (quadratische Abweichungen der interessierenden Zustands- und Ausgangsgrößen von ihrem Sollwert bei Führungs- und Störungssprüngen) in Form statischer nichtlinearer Funktionen ausgedrückt werden. Der Stabilitätsbereich grenzt sich selbst vom instabilen Bereich ab, da auf der Stabilitätsgrenze die Gütefunktionen Pole haben. Diese Vorgehensweise wurde bereits in [11] skizziert. Als Bedingung für die Effizienz der Lösung gilt die Stationarität der positiven Linearkombination der Einzelgütefunktionen. Das in [10] vorgeschlagene steuerungsorientierte Dialogverfahren, das auf der Bedingung der Antiparallelität der Gradienten zweier Linearkombinationen der Gütefunktionen beruht, kann hierbei zur Anwendung gebracht werden, da man nachweisen kann, daß die Kompromißmenge eines solchen Problems konvex gekrümmt ist.

4. Konzept des störausregelnden, realisierbaren Folgereglers mit freier Struktur (dynamische Kompensation)

Dieses Konzept stellt eine Modifikation der besonders in den Arbeiten [3] [4] und [6] vorgestellten Methoden der linearen Optimalsteuerung und der dynamischen Kompensation dar. Während mit Hilfe der Methoden der linearen Optimalsteuerung die Optimierungsaufgabe gelöst wird, garantiert das Konzept der dynamischen Kompensation die Realisierbarkeit der gefundenen Lösung. Die so entstehende Rückführstruktur geht weit über den Rahmen von einfachen PI- oder PID-Reglern hinaus. Sie wird realisiert mit Hilfe von Integratoren und Proportionalgliedern, und sie stellt die optimale Variante der Kombination dieser Bausteine im Sinne der gefundenen Kompromißlösung dar. Der zu treibende Aufwand ist beträchtlich und erfordert vom Anwender solide praktische und theoretische Kenntnisse.

Sehr wesentlich für die Regler (Kompensator)-struktur ist der Angriffspunkt der Störung bzw. der Führung. In [4] wurde der Vorschlag gemacht, in Abhängigkeit vom Beobachtbarkeitsindex v_0 der Regelstrecke mit $v_0' = v_0 - 1$ v_0' Integratorstufen vor das Originalsystem zu schalten.

Diese Konzeption geht auf, wenn von konstanten Zustandsstörungen gesprochen werden kann. Viele reale Systeme weisen aber eingangsseitige Störungen auf. Will man diese berücksichtigen, so muß der in [4] vorgeschlagenen Anzahl von Integratorstufen noch eine Stufe hinzugefügt werden. Eine zusätzliche Erweiterung der Kompensatorstruktur kann darin bestehen, die immer vorhandene Trägheit der Reglerbausteine schon im Ansatz der Zustandsgleichungen zu berücksichtigen, indem zum Beispiel vor den „idealen Regler" eine PT_1-Stufe mit „Summenzeitkonstanten" geschaltet wird. Natürlich kann dieses Verzögerungsglied auch die Trägheit des Soll/Ist-Vergleiches darstellen usw. Man benutzt in der weiteren Rechnung nicht die Regelabweichungen, sondern die einfach verzögerten Regelabweichungen, wobei die Zeitkonstante der Verzögerung durch die Zeitkonstanten der verwendeten Reglerbausteine (Verstärker, Integratoren) bestimmt wird. Diese zweite Erweiterung zusammen mit der ersten lassen es zu, bei beliebigem Angriffspunkt der sprungförmigen Störung und bei Führungssprüngen sämtliche Güteeigenschaften des mehrdimensionalen Regelkreises zu untersuchen. Somit ist eine gewisse Universalität der Kompensatorstruktur erreicht, die allerdings mit einer Erhöhung der Ordnung des Gesamtsystems verbunden ist. Für

Spezialfälle kann diese universelle Struktur wesentlich in ihrer Ordnung reduziert werden.

4.1. *Notwendige Bedingungen für die Wahl effizienter Rückführungen und ihre Ausnutzung für Dialogverfahren*

Unter Verwendung der Methoden der linearen Optimalsteuerung [6] und [12] können verschiedene Bedingungen der Optimalität gefunden werden. Über das Konzept der dynamischen Programmierung entsteht als notwendige Bedingung bei linearen Systemen die sog. stationäre Matrix-Riccati-Gleichung. Das heißt, daß bei der Nichttransformation der Gütefunktionale über die Parsevalschen Formeln andere notwendige Bedingungen für die Effizienz berücksichtigt werden müssen. Es wäre interessant zu zeigen, wie diese Bedingungen ineinander übergehen. Bei praktisch durchgerechneten gleichen Strukturen fallen die Lösungen über die Parsevalschen Formeln und die über die stationäre Matrix-Riccati-Gleichung — wie auch nicht anders zu erwarten — zusammen. Es kann nachgewiesen werden, daß die Kompromißmenge konvex ist. Damit gilt das Effizienztheorem, was für den Aufbau eines Dialogverfahrens von großer Bedeutung ist.

Das Originalsystem wird beschrieben durch:

$$\dot{\boldsymbol{x}}' = A'\boldsymbol{x}' + B'(\boldsymbol{u} + \boldsymbol{z}) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{y} = C\boldsymbol{x}'. \tag{2}$$

Es sei steuerbar und beobachtbar. Dazu kommt noch der Soll/Ist-Vergleich und die Berücksichtigung der Reglerträgheit durch Verzögerungssysteme 1. Ordnung:

$$\boldsymbol{s}' = \boldsymbol{y} - \boldsymbol{w} \tag{3}$$

$$T\dot{\boldsymbol{s}} = -\boldsymbol{s} + \boldsymbol{s}'. \tag{4}$$

T Diagonalmatrix mit den Elementen $T_{ii} = T_i$

Für $T^{-1} = D$ ergibt sich eine Diagonalmatrix mit den Elementen $d_{ii} = D_i$. Als Störung $z = z_0\sigma(t)$ und als Führung $\boldsymbol{w} = \boldsymbol{w}_0\sigma(t)$ werden Sprünge angesetzt. Erste Aufgabe des Entwurfsingenieurs ist die Auswahl der Größen aus den Vektoren $\boldsymbol{x}'$ und $\boldsymbol{s}$, deren Verlauf optimiert werden soll. Weiterhin ist es möglich, ein erweitertes Originalsystem aus den Gln. (1) bis (4) aufzuschreiben:

$$\begin{pmatrix}\dot{\boldsymbol{x}}' \\ \dot{\boldsymbol{s}}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}A' & 0 \\ DC & -D\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\boldsymbol{x}' \\ \boldsymbol{s}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}B' & 0 \\ 0 & D\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{z} \\ -\boldsymbol{w}\end{pmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{s}_a = (0 \quad E)\begin{pmatrix}\boldsymbol{x}' \\ \boldsymbol{s}\end{pmatrix}. \tag{6}$$

Durch Ranguntersuchungen erhält man die Anzahl der Größen aus $\boldsymbol{x}'$ und $\boldsymbol{s}$, die mit Sicherheit durch die Steuerung $\boldsymbol{u}$ zu Null gemacht werden können. Für diese gibt es keine bleibende Regelabweichung, wenn sich $\boldsymbol{w}$ und $\boldsymbol{z}$ sprungartig ändern bzw. konstant aber verschieden von Null sind. Gesetzt den Fall, daß sämtliche Regelabweichungen s_i zu Null gemacht werden können, erhält man für verschwindende Anfangsbedingungen bei $\boldsymbol{w} = \boldsymbol{w}_0$ und $\boldsymbol{z} = \boldsymbol{z}_0$ folgende Gleichungen für die flüchtigen Lösungsanteile:

$$\begin{pmatrix}\dot{\boldsymbol{x}}_f' \\ \dot{\boldsymbol{s}}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}A' & 0 \\ DC & -D\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\boldsymbol{x}_f' \\ \boldsymbol{s}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}B' \\ 0\end{pmatrix} \times$$
$$\times \left(\boldsymbol{u} + \boldsymbol{z}_0 + (CA'^{-1}B')^{-1}\boldsymbol{w}_0\right)$$

$$\boldsymbol{s}_a = (0 \quad E)\begin{pmatrix}\boldsymbol{x}_f' \\ \boldsymbol{s}\end{pmatrix}$$

oder

$$\dot{\boldsymbol{x}} = A\boldsymbol{x} + B(\boldsymbol{u} + \boldsymbol{z}_0 + R\boldsymbol{w}_0) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{s}_a = (0 \quad E)\,\boldsymbol{x} \tag{8}$$

mit

$$\boldsymbol{x}'(0) = \boldsymbol{s}(0) = 0$$

oder

$$\boldsymbol{x}_f'(0) = -\boldsymbol{x}_{st}'(0) \tag{9}$$
$$\boldsymbol{s}(0) = 0 \quad \text{und} \quad \boldsymbol{w}(0) = \boldsymbol{w}_0, \quad z(0) = \boldsymbol{z}_0.$$

Mit Hilfe der Gln. (7) und (8) kann man den Beobachtbarkeitsindex v_0 des erweiterten, transformierten Originalsystems bestimmen. Dieser legt die Anzahl der zur Ausregelung und zur praktischen Realisierung notwendigen Integratorstufen fest:

$$\boldsymbol{u}_1 = \boldsymbol{u} + \boldsymbol{z}_0 + R\boldsymbol{w}_0, \qquad \dot{\boldsymbol{u}}_1 = \boldsymbol{u}_2, \dots, \dot{\boldsymbol{u}}_{v_0} = \boldsymbol{q}. \tag{10}$$

Außerdem kann an dieser Stelle die Frage nach den bis hierher unbekannten Zeitkonstanten T_i des Reglers auf Grund der nun bekannten Anzahl von v_0 Integratorstufen und der entsprechenden Menge von Potentiometern beantwortet werden. Das Regelungssystem, dessen optimale Proportionalrückführung $\boldsymbol{q} = \boldsymbol{q}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}_1, \dots, \boldsymbol{u}_{v_0})$ gesucht wird, hat damit folgende Zustandsgleichung:

$$\begin{pmatrix}\dot{\boldsymbol{x}} \\ \dot{\boldsymbol{u}}_1 \\ \cdot \\ \vdots \\ \dot{\boldsymbol{u}}_{v_0-1} \\ \dot{\boldsymbol{u}}_{v_0}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}A & B & 0 & . & \dots & 0 \\ 0 & 0 & E & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E & \dots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & E \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0\end{pmatrix}\boldsymbol{x}'' + \begin{pmatrix}0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ E\end{pmatrix} q \tag{11}$$

oder $\dot{\boldsymbol{x}}'' = A''\boldsymbol{x}'' + B''q$.

Die einzelnen Gütefunktionen lauten dann:

$$Q_{xi} = \int_0^\infty x_i^2 \,dt, \qquad i = 1, \dots, n$$

$$Q_{u1i} = \int_0^\infty u_{1i}^2 \,dt, \qquad i = 1, \dots, m$$

$$\vdots$$

$$Q_{uvoi} = \int_0^\infty u_{voi}^2 \,dt, \qquad i = 1, \dots, m$$

und

$$Q_{qi} = \int_0^\infty q_i^2 \,dt, \qquad i = 1, \dots, m.$$

Durch die Gültigkeit des Effizienztheorems bei konvex gekrümmten Kompromißmengen kann man jeden Kompromißpunkt durch die folgende Aufgabe erreichen:

$$\int_0^\infty \boldsymbol{x}''^T\lambda x'' + \boldsymbol{q}^T\varrho\boldsymbol{q}\,dt = \min!, \tag{12}$$

wobei

$$\lambda = (\lambda_{ij}) \quad \text{mit} \quad \lambda_{ij} = \begin{cases}\lambda_i & \text{für} \quad i = j \\ 0 & \text{für} \quad i \neq j\end{cases}$$
und
$$\varrho = (\varrho_{ij}) \quad \text{mit} \quad \varrho_{ij} = \begin{cases}\varrho_i & \text{für} \quad i = j \\ 0 & \text{für} \quad i \neq j\end{cases}. \tag{13}$$

Bei $\lambda_i > 0$ und bei $\varrho_i > 0$ ist der Integrand positiv definit, und als notwendige Bedingung für ein Minimum — in unserem Fall also für Effizienz — gilt die stationäre Matrix-Riccati-Gleichung:

$$PA'' + A''^TP - PB''^T\varrho^{-1}B''P + \lambda = 0. \tag{14}$$

Dabei gilt für die Rückführung:

$$q = -\varrho^{-1}B''^TP\boldsymbol{x}'' = K\boldsymbol{x}''. \tag{15}$$

Die Matrizengleichung (14) besteht aus einer Anzahl $r = (n + v_0 m)^2$ nichtlinearer, quadratischer, algebraischer Gleichungen mit r Unbekannten. Die Gleichungen sind parametrisiert durch die Gewichtskoeffizienten einer positiven Linearkombination der Einzelgütefunktionen (12). Auf Grund der Gültigkeit des Effizienztheorems beschreiben damit diese Glei-

chungen sämtliche effizienten Punkte des Polyoptimierungsproblems. Infolge der besonderen Struktur der Matrizen A'' und B'' kann die Anzahl r der unbekannten Parameter P_{ij} und die Anzahl der Gleichungen auf die Zahl $r_r = (n + v_0 m)\, m$ reduziert werden.

Als Grundlage des Dialoges dient das in [10] vorgeschlagene Verfahren der Einteilung der Gütefunktionen in zwei durchschnittsfremde Klassen. Durch diese Einteilung der Gütegrößen in zu verbessernde und sich verschlechternde wird die Richtung des nächsten Schrittes sowohl im Raum der Gütekriterien (Zielraum) wie auch im Raum der Reglerparameter (Steuerraum) festgelegt. Da für die Ermittlung dieser Richtung der Algorithmus paralleler Gradienten [9] und [10] wegen der Andersartigkeit der notwendigen Bedingung für Effizienz nicht benutzt werden kann, muß ein anderer Schrittalgorithmus entwickelt werden. Bei den bisher durchgerechneten Beispielen bewährte sich ein Schluchtensuchverfahren, auf das hier aus Umfangsgründen nicht eingegangen werden soll.

Ein anderes Problem stellt die Wahl des Startpunktes dar. Zum Beispiel kann man als Startpunkt die eigennützige Lösung für minimalen „Stellaufwand" nehmen. Im Fall stabiler Strecken kann dieser Punkt durch ein nichtlineares Gleichungssystem der Dimension $v_0 m^2$ bestimmt werden.

Wenn man prinzipiell auf die Transformation der Gütefunktionen mit Hilfe der Parsevalschen Formeln verzichten will oder muß bzw. wenn man noch Auskunft über Überschwingweiten, Ausregelzeiten usw. braucht, muß man sich durch Simulationsläufe die entsprechenden Informationen verschaffen.

4.2. *Beispiel*

Regelstrecke:

$$\begin{pmatrix}\dot{x}_1'\\ \dot{x}_2'\\ \dot{x}_3'\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ -1 & -2 & -2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1'\\ x_2'\\ x_3'\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}0\\ 0\\ 1\end{pmatrix}(u+z)$$

$$y = (1\quad 0\quad 0)\begin{pmatrix}x_1'\\ x_2'\\ x_3'\end{pmatrix}$$

Soll/Ist-Vergleich: $s' = y - w$

Reglerverzögerung: $T\dot{s} = -s + s'$.

Nach Gl. (5) und Gl. (6):

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1'\\ \dot{x}_2'\\ \dot{x}_3'\\ \dot{s}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ -1 & -2 & -2 & 0\\ \frac{1}{T} & 0 & 0 & \frac{1}{T}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1'\\ x_2'\\ x_3'\\ s\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 0\\ 1 & 0\\ 0 & \frac{1}{T}\end{bmatrix}\begin{pmatrix}u+z\\ w\end{pmatrix}$$

$$s = (0\quad 0\quad 0\quad 1)\begin{pmatrix}x_1'\\ x_2'\\ x_3'\\ s\end{pmatrix}.$$

Da durch u nur eine Größe sicher zu Null gemacht werden kann, entscheidet sich der Entwurfsingenieur natürlich für die Regelabweichung s. Es ergeben sich folgende stationäre Werte: $z = z_0$, $w = w_0$, $x'_{1st} = w_0$, $x'_{2st} = x'_{3st} = 0$, $u_{st} = w_0 - z_0$, $s_{st} = 0$. Für die flüchtigen Anteile erhält man nun nach Gl. (7) und Gl. (8):

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_{1f}'\\ \dot{x}_{2f}'\\ \dot{x}_{3f}'\\ \dot{s}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ -1 & -2 & -2 & 0\\ \frac{1}{T} & 0 & 0 & \frac{1}{T}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{1f}'\\ x_{2f}'\\ x_{3f}'\\ s\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ 0\\ 1\\ 0\end{bmatrix}(u + z_0 - w_0)$$

bzw.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = A\boldsymbol{x} + B(u + z_0 - w_0)$$
$$s_a = (0\quad 0\quad 0\quad 1)\,\boldsymbol{x}\,.$$

Als Beobachtbarkeitsindex v_0 ergibt sich $v_0 = 4$. Im Gegensatz zu der in [4] vorgeschlagenen Methode werden jetzt, um eingangsseitige Störungen berücksichtigen zu können, nicht nur $v_0 - 1 = 3$ Integratorstufen, sondern $v_0 = 4$ Stufen eingesetzt, wodurch die Ordnung des Systems auf 8 erweitert wird. Für einen Regler mit 4 Integratorstufen und der entsprechenden Menge Potentiometer wird eine „Summenzeitkonstante" von $T = 1$ angenommen.

Die Zustandsgleichung des zu optimierenden Systems hat folgende Gestalt:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_{1f}'\\ \dot{x}_{2f}'\\ \dot{x}_{3f}'\\ \dot{s}\\ \dot{u}_1\\ \dot{u}_2\\ \dot{u}_3\\ \dot{u}_4\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ -1 & -2 & -2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{1f}'\\ x_{2f}'\\ x_{3f}'\\ s'\\ u_1\\ u_2\\ u_3\\ u_4\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 1\end{bmatrix} q\,.$$

Als Minimierungsaufgabe der Linearkombination der einzelnen Gütefunktionen erhält man:

$$\int_0^\infty (\lambda_1 x_{1f}'^2 + \lambda_2 x_{2f}'^2 + \lambda_3 x_{3f}'^2 + \lambda_4 s^2 + \lambda_5 u_1^2 + \lambda_6 u_2^2 + \lambda_7 u_3^2 + {} + \lambda_8 u_4^2 + \varrho q^2)\, dt = \min!$$

und für die Rückführung:

$$q = K_1 x_{1f}' + K_2 x_{2f}' + K_3 x_{3f}' + K_4 s + K_5 u_1 + K_6 u_2 + {} + K_7 u_3 + K_8 u_4\,.$$

Aus dem reduzierten Gleichungssystem der stationären Matrix-Riccati-Gleichung ergeben sich acht notwendige Bedingungen für die Effizienz:

$$\varrho F_i(K_1, \ldots, K_8) + \sum_{j=1}^{8} c_{ij}\lambda_j = 0\,, \qquad i = 1, \ldots, 8\,.$$

Dabei sind die c_{ij} Konstanten und die F_i quadratische Funktionen. Der Entwurfsingenieur interessiert sich dabei nur für die Regelabweichung s und für den Verlauf der Steuerung u_1. So erhalten die Gewichtsfaktoren folgende Werte zugeordnet:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_6 = \lambda_7 = \lambda_8 = 0\,,\ \ \lambda_4 = \lambda_s \geqq 0\,,\ \ \lambda_5 = \lambda_u \geqq 0$$

mit $\lambda_s + \lambda_u = 1$.

Da auch der Verlauf von q im Prinzip uninteressant ist, wird für $\varrho = \varrho_0 = 0{,}0001$ angesetzt. Also gibt es für den Entscheidungsträger während des gesamten Dialogprozesses nur 3 interessierende Gütefunktionen:

$$Q_s = \int_0^\infty s^2\, dt\,, \qquad Q_u = \int_0^\infty u_1^2\, dt \quad \text{und} \quad Q_q = \int_0^\infty q^2\, dt\,.$$

Als eigennütziger Punkt für minimalen Stellaufwand (Startpunkt) ergibt sich für die Rückführparameter:

$$K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = 0\,, \qquad \begin{aligned} K_5 &= -100{,}000\,000\\ K_6 &= -82{,}634\,308\\ K_7 &= -34{,}142\,138\\ K_8 &= -8{,}263\,430\end{aligned}$$

bei $\lambda_s = 0$ und $\lambda_u = 1$, $\varrho = 0{,}0001$.

Als Werte der Gütefunktionen ergeben sich diese in Abhängigkeit von den Sprunghöhen der Störung und der Führung z_0 und w_0:

	$z_0 = 2$	$z_0 = 1$	$z_0 = 0$	
Q_s	0,676	1,083	7,267	$z_0 + w_0 = 2$
Q_u	2,892	0,000	2,892	
Q_q	4131,9	0,000	4131,9	$z_0, w_0 \geqq 0$.

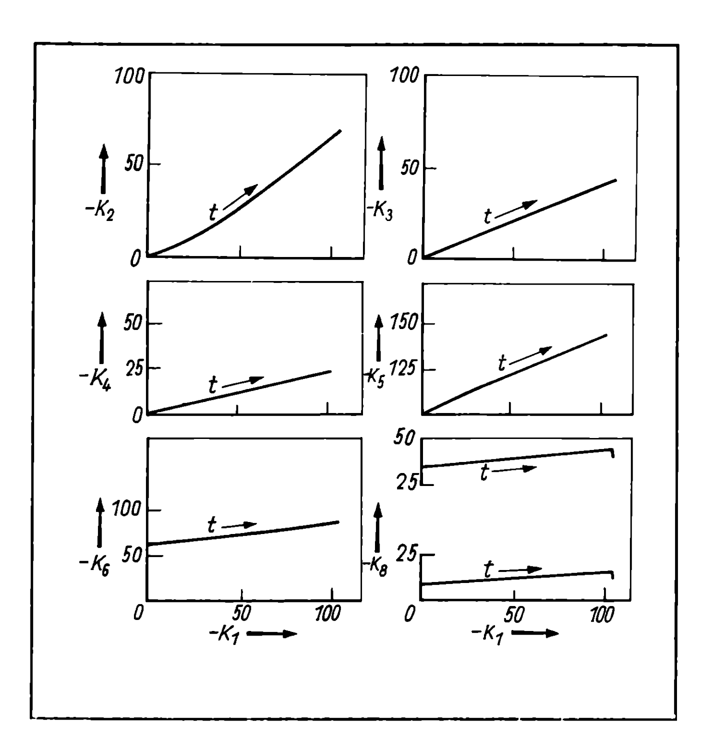


Bild 1. Verlauf der Rückführparameter während des Dialoges
t Dialogzeit

Die Forderung des Entscheidungsträgers vom Startpunkt aus lautet nun: Verbesserung von Q_s auf Kosten von Q_u und Q_q! Entsprechend der in [10] vorgeschlagenen Weise werden nun die Ersatzkriterien Q_1' und Q_2' gebildet:

$$Q_1' = \frac{1}{1+\varrho_0} Q_u + \frac{\varrho_0}{1+\varrho_0} Q_q\,,$$

$$Q_2' = Q_s\,.$$

Es wird der Forderung des Entscheidungsträgers entsprochen, indem sich der Algorithmus (in diesem Fall ein Schluchtensuchverfahren) vom eigennützigen Punkt des Kriteriums Q_1' aus längs der Kompromißmenge des Problems

$$(Q_1', Q_2') = \min!$$

zum eigennützigen Punkt von Q_2' bewegt. Im Raum der Rückführparameter entsteht dadurch die effiziente Steuerkurve dieses speziellen Kompromißproblems. Der Entscheidungsträger bricht diesen Prozeß ab, wenn ihm die Werte der Gütefunktionen entweder zufriedenstellen oder wenn er eine andere Verbesserungsrichtung wünscht. Im letzten Fall werden neue Q_1' und Q_2' gebildet, und es läuft der gleiche Suchprozeß ab usw. Diese entstehende Kurve ist für den Fall des Abbruchs während der ersten Etappe im Bild 1 dargestellt.
Infolge der zu verwirklichenden Ausgangsrückführung und der 4 Integratorstufen sowie der angenommenen Verzögerung des Reglers ergibt sich dieser als PID$_3$-Regler mit Verzögerung 4. Ordnung (G_{RH}) mit einer zusätzlichen w-Aufschaltung über ein PD$_3$-Glied mit Verzögerung 4. Ordnung (G_{RN}). Es gilt:

$$v(p) = -u(p) = G_{RH}(p)\, s'(p) + G_{RN}(p)\, w(p)$$

$$G_{RH}(p) = \frac{K_H + \frac{K_I}{p} + K_{D1}p + K_{D2}p^2 + K_{D3}p^3}{(1+p)\,(T_3^3p^3 + T_2^2p^2 + T_1p + 1)}$$

$$G_{RN}(p) = \frac{K_N + K_{D1}p + K_{D2}p^2 + K_{D3}p^3}{(1+p)\,(T_3^3p^3 + T_2^2p^2 + T_1p + 1)}\,.$$

Die Reglerparameter errechnen sich aus den Zustandsrückführkonstanten K_1:

$$K_H = \frac{3K_5 + K_2 + K_1}{K_6}\,,\qquad K_I = \frac{K_5 + K_4 + K_1}{K_6}\,,$$

$$K_{D1} = \frac{4K_5 + K_3 + K_2}{K_6}\,,\qquad K_{D2} = \frac{3K_5 + K_3}{K_6}\,,$$

$$K_{D3} = \frac{K_5}{K_6}\,,\qquad K_N = \frac{2K_5 + K_2}{K_6}\,,\qquad T_1 = \frac{K_7}{K_6}\,,$$

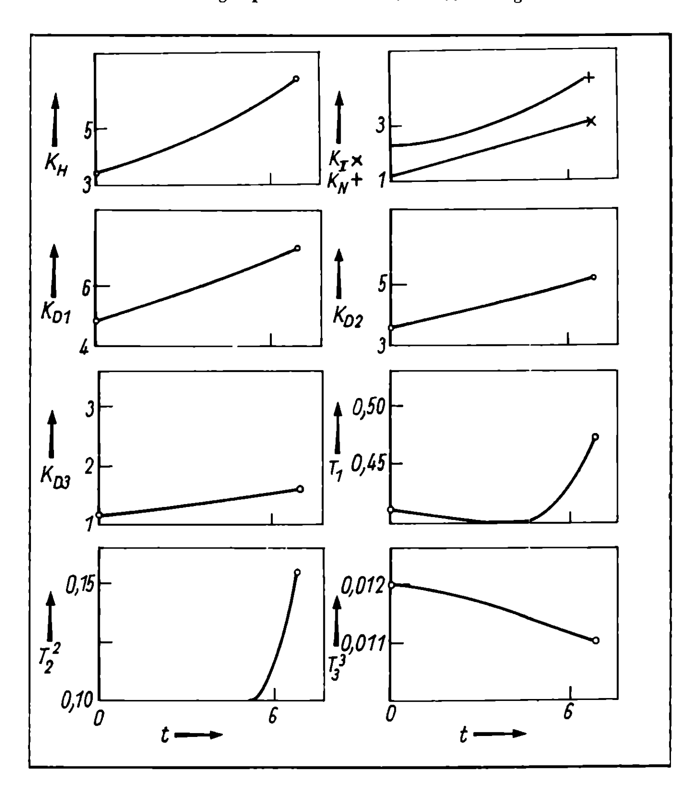
$$T_2^2 = \frac{K_8}{K_6}\,,\qquad T_3^3 = -\frac{1}{K_6}\,.$$

Im Bild 2 ist der Verlauf dieser Reglerparameter während des Dialoges als Funktion der „Dialogzeit“ t dargestellt. Obwohl die notwendigen Bedingungen für Effizienz im Raum der Zustandsrückführkonstanten (14) nicht von den Sprunghöhen z_0 und w_0 abhängen, bestimmen diese den Wert der Gütefunktionen ganz entscheidend. Das heißt, daß sich über der gleichen effizienten Steuerkurve in Abhängigkeit vom Verhältnis z_0/w_0 eine andere Kompromißmenge des Problems $(Q_1', Q_2') = \min!$ und damit ein anderer Verlauf der Gütefunktionen als Funktion der Dialogzeit t aufbaut. Durch die Bedingung $w_0 + z_0 = \text{konst.} > 0$; $w_0, z_0 \geqq 0$ können diese Situationen mit w_0 oder z_0 parametrisiert werden. Im Bild 3 sind für 3 Fälle die Kompromißmengen dargestellt, während im Bild 4 die entsprechenden Verläufe der Gütefunktionen als Funktion der Dialogzeit bis $t = 7$ aufgezeichnet sind. Da zum Zeitpunkt $t = 7$ (7 s Kernspeicherzeit des Algorithmus auf ICL 470) der Kompromiß den Vorstellungen des angenommenen Entscheidungsträgers entsprach, wurde der Dialog abgebrochen. Die praktische Verwirklichung dieses Reglers mit Hilfe von Integratoren und Potentiometer zeigt Bild 5.

Zusammenfassung

Es ist möglich, auf Grund der Ausnutzung der stationären Matrix-Riccati-Gleichung einen Dialogprozeß zur Optimierung linearer, mehrdimensionaler Systeme aufzubauen. Durch die Verwendung des Prinzips der dynamischen Kompensation werden die im Dialog gefundenen Zustandsrückführparameter durch eine Ausgangsrückführung realisiert. Die Ordnung des Gesamtproblems hängt von der Ordnung der Strecke, von der Notwendigkeit der Berücksichtigung von Eingangsstörungen

Bild 2. Verlauf der Reglerparameter während des Dialoges



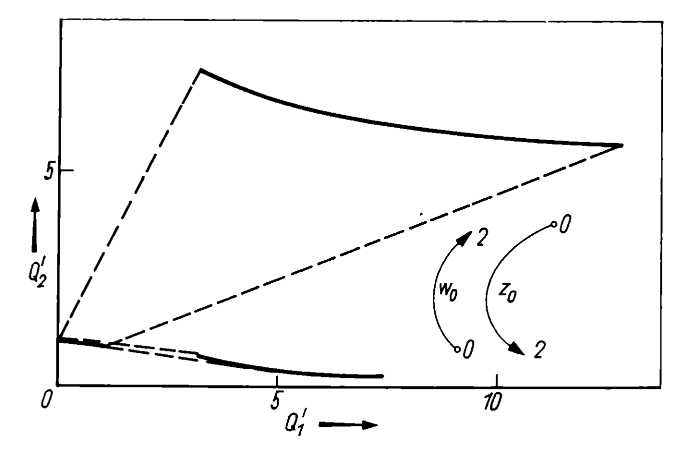


Bild 3. Kompromißmenge des Problems (Q_1', Q_2') = min! als Funktion der Sprunghöhen

und Führungssprüngen sowie vom Beobachtbarkeitsindex der Strecke ab. Eine wesentliche Reduzierung des Gleichungssystems der notwendigen Bedingungen ist durch die besondere Struktur der Systemmatrix des erweiterten Systems und seiner Steuermatrix möglich. Obwohl das Verhältnis der Störungssprunghöhe zur Führungssprunghöhe keinen Einfluß auf die Effizienzbedingung im Zustandsrückführparameterraum hat, kann durch die trotzdem vorhandene Abhängigkeit der Gütegrößen von diesem Verhältnis je nach Ansicht des Entscheidungsträgers für das optimale Verhältnis der Gütegrößen eine Abhängigkeit der Rückführparameter von Führung und Störung entstehen.

Am Beispiel wird auch klar, um wieviel sich der gerätetechnische Aufwand bei der Anwendung der Methode der linearen Optimalsteuerung gegenüber einer fest vorgegebenen (z. B. PI-Rückführung) erhöht.

Beim Dialog selbst stellt die Lösung der nichtlinearen stationären Matrix-Riccati-Gleichung — auch in ihrer reduzierten Form — ein Aufwandsproblem dar, das in dem Fall noch verschärft wird, wenn sich die Notwendigkeit von Simulationsläufen ergeben sollte. Auch die Forderungen an die mathematische Vorbereitung und die Programmierung des Dialoges sind hoch. Effektiv ist das Verfahren, wenn der Entscheidungsträger einen direkten Kontakt mit der Maschine, sprich mit dem Modell, hat, z. B. über Terminals und Zeichendisplay.

Ohne Einsatz der modernen Rechentechnik ist der Dialog undenkbar. Vom Entscheidungsträger selbst muß hohe Sachkenntnis verlangt werden, muß er sich doch sowohl am zu automatisierenden Objekt wie auch an der Regelungseinrichtung auskennen.

Wie aus der linearen Optimalsteuerung bekannt ist, benötigt man für die Realisierung außerdem ein sehr genaues Modell. All diese Feststellungen lassen nur den Schluß zu, daß ein derartiger Dialog nur im Fall extrem hoher Genauigkeitsforderungen, wenn sich also der Aufwand lohnt, angebracht ist.

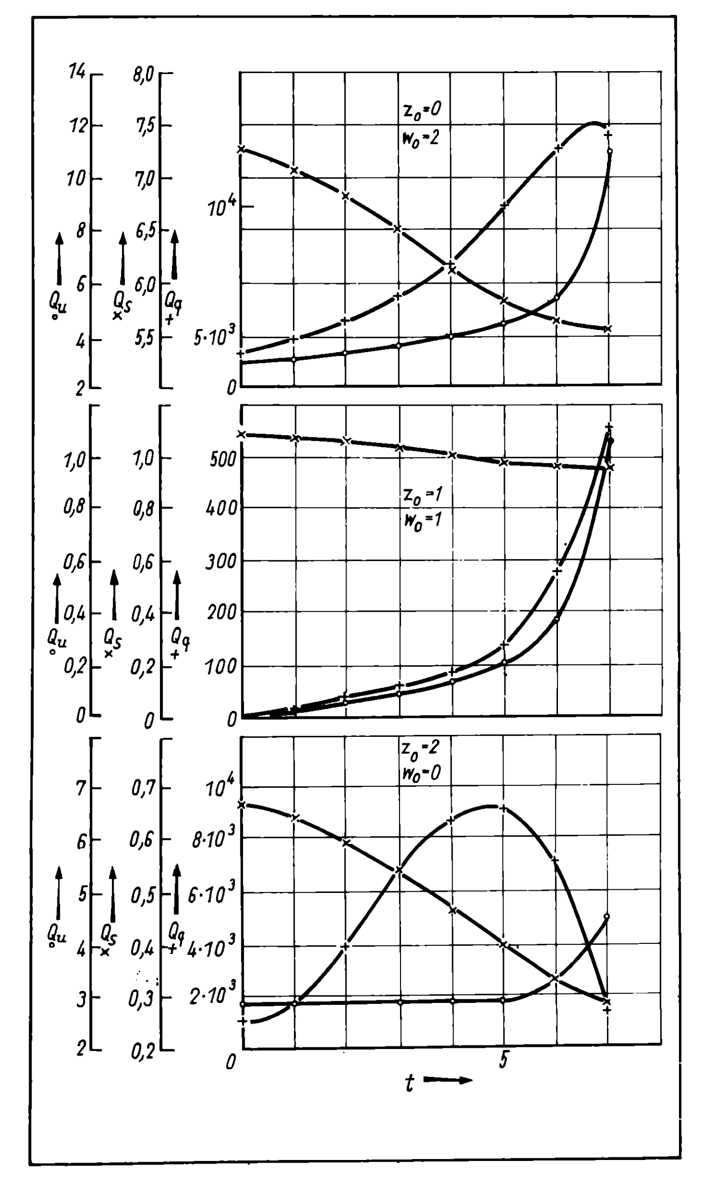


Bild 4. Verlauf der Gütewerte während des Dialoges

Literatur

[1] *Wilfert, H.-H.*; *Korn, U.*: Mehrgrößenregelung: Erreichter theoretischer Stand und Möglichkeiten der praktischen Nutzung, Jahrestagung der WGWA 1976.

[2] *Peschel, M.*; *Riedel, C.*: Polyoptimierung — eine Entscheidungshilfe für ingenieurtechnische Kompromißlösungen. Berlin: VEB Verlag Technik 1975.

[3] *Korn, U.*; *Rybak, J.*: Zum Entwurf optimaler Regeleinrichtungen für lineare, zeitinvariante Systeme mit externen, konstanten Störungen. msr **16** (1973) H. 8, S. 311—315.

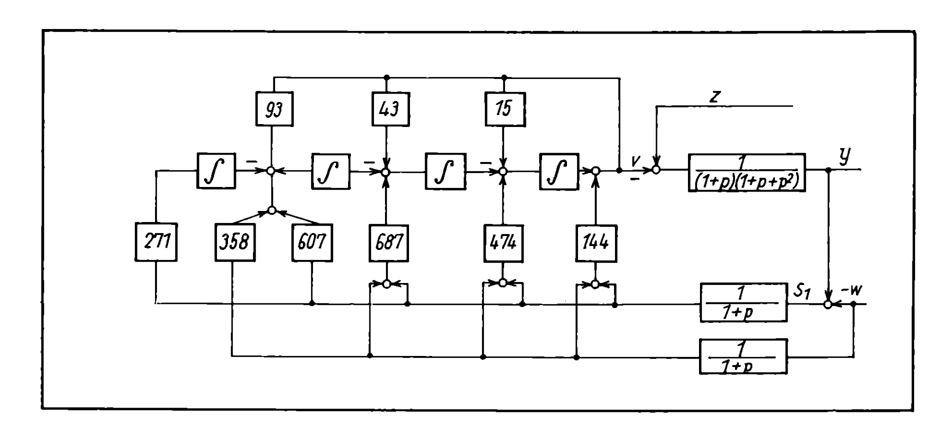


Bild 5. Regleraufbau (Dialogzeit t = 7 s)

[4] *Korn, U.*; *Rybak, J.*: Zur Anwendung des Prinzips der dynamischen Kompensation auf aperiodisch gestörte Mehrgrößensysteme. msr 19 (1976) H. 5, S. 171–174.

[5] *Pearson, J. B.*; *Ding, C. Y.*: Compensator design for multivariable linear systems. IEEE Trans. Aut. Contr. AC-14 (1969) No. 2, pp. 130–134.

[6] *Januschewski, R. T.*: Theorie optimaler, linearer Mehrgrößensysteme (russ.). Moskau: Nauka 1973.

[7] *Ester, J.*: Eine Kompromißstrategie zur statischen Optimierung additiver und vektorieller Gütefunktionen. Dissertation, TH Karl-Marx-Stadt 1975.

[8] *Ester, J.*; *Peschel, M.*; *Riedel, C.*: Mathematische Grundlagen der Polyoptimierung.

[9] *Ester, J.*: Bestimmung der Kompromißmenge mit Hilfe des Verfahrens paralleler Gradienten.

[10] *Ester, J.*; *Müller, R.*; *Riedel, C.*: Dialogverfahren als Grundlage von Entscheidungen bei Kompromißsituationen.

[11] *Ester, J.*; *Riedel, C.*; *Schildbach, T.*: Optimierung des Führungs und Störungsverhaltens technischer Regelkreise. Wissenschaftliche Schriftenreihe der TH Karl-Marx-Stadt (1975) Polyoptimierung, Bd. 1 und 2.

[12] *Kucera, V.*: A review of the matrix Riccati equation. Kybernetika (1973) No. 9.

[13] *Davison, E. J.*; *Goldberg, H.*: Robust control of a general servomechanism problem: The servo compensator. IFAC-Kongreß, Boston 1975, Paper 9.5.

[14] *Muckli, W.*; *Kraemer, W.*: Reglereinstellungen an nichtentkoppelten Zweigrößenregelungen. Regelungstechnik und Prozeßdatenverarbeitung 20 (1972), H. 4, S. 155–163.

[15] *Gerastschenko, E. I.*; *Gerastschenko, S. M.*: Methode der Phasenzerlegung und der Optimierung nichtlinearer Systeme (russ.). Moskau: Nauka 1975.

[16] *Reinisch, K.*: Hierarchische Systeme der automatischen Steuerung. Sitzungsberichte des Plenums und der Klassen der AdW der DDR (1972) H. 3.

msr 6584

Prof. Dr.-Ing. habil. *M. Krauß*, Karl-Marx-Stadt [1])

Zur Grenze der Meßgenauigkeit bei gestörten Übertragungssystemen

IA 4.2.3.0

1. Problemstellung

Eine zu messende Größe (Eingangsinformation) wird in eine Ausgangsgröße (Ausgangsinformation) umgesetzt. Die Ausgangsgröße ist hierbei der Meßwert. Dabei erreicht im informationstheoretischen Sinn nicht die volle von der Informationsquelle gelieferte Information die Informationssenke am Systemausgang. Es tritt ein Übertragungsfehler $\varepsilon(t, \tau)$ auf (Bild 1).

In [1] wird gezeigt, wie mit den informationstheoretischen Kenngrößen „Transinformation" und „Entscheidungsgehalt" die Genauigkeit bei der Erfassung des Meßwertes, des Ausgangssignals $z_a(t)$, bestimmt werden kann. Der Beitrag beschäftigt sich mit der Ermittlung der Grenze dieser Meßgenauigkeit durch Korrekturmaßnahmen, wie sie, bedingt durch den steigenden Einsatz von Mikrorechnern, bei Meßinformationssystemen möglich sind.

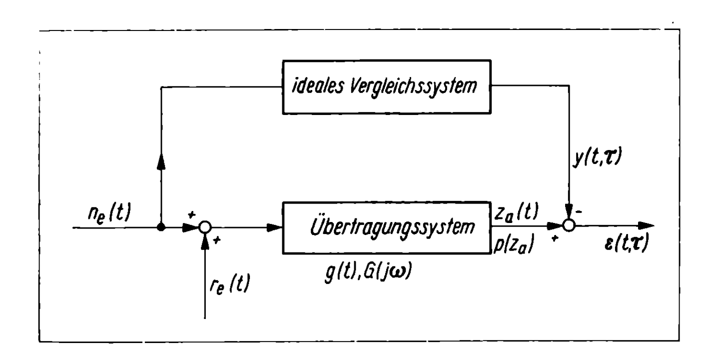


Bild 1. Modell eines Meßinformationssystems

$n_e(t)$ Eingangsnutzsignal (zu messende physikalische Größe, Meßgröße); $r_e(t)$ Störsignal; $z_a(t)$ Gesamtausgangssignal (Meßwert, Istwert); $y(t)$ gewünschte Ausgangsgröße (Sollwert); $\varepsilon(t, \tau)$ auftretender Übertragungsfehler; $p(z_a)$ Verteilungsdichte des Ausgangssignals; $g(t)$, $G(j\omega)$ Gewichtsfunktion, Frequenzgang des gesamten Übertragungssystems (einschließlich Meßsystem)

[1]) Mitteilung aus der Sektion Informationstechnik der TH Karl-Marx-Stadt.

2. Meßgenauigkeit bei gestörten Meßinformationssystemen

Das analoge Ausgangssignal $z_a(t)$ (Meßwert) kann, bedingt durch das Fehlersignal $\varepsilon(t, \tau)$, auf ein diskretes Signal zurückgeführt und folglich in amplitudenmäßiger Hinsicht quantisiert werden. Dabei erhält man bekanntlich für die Anzahl n dieser Amplitudenstufen [1]

$$n = \sqrt{K \frac{\overline{z_a^2(t)}}{\overline{\varepsilon^2(t, \tau)}}}\,, \tag{1}$$

wobei K eine von den Verteilungsdichten von Gesamtausgangs- und Fehlersignal abhängige Konstante ist und $\overline{z_a^2(t)}$, $\overline{\varepsilon^2(t, \tau)}$ die mittleren Leistungen dieser Signale darstellen. In [1] wurde gezeigt, daß für die Angabe der Meßgenauigkeit neben der Anzahl der Amplitudenstufen die Intervallbreite notwendig ist. Dabei ist informationstheoretisch die Amplitudenstufung wie folgt zu wählen, wenn $z^*_{a_{\nu-1}} \dots z^*_{a_\nu}$ ein beliebiges Quantisierungsintervall darstellt (Schwellwert):

$$\int_{z^*_{a_{\nu-1}}}^{z^*_{a_\nu}} p(z_a)\,\mathrm{d}z_a = \frac{1}{n} = \sqrt{\frac{1}{K} \frac{\overline{\varepsilon^2(t, \tau)}}{\overline{z_a^2(t)}}}\,. \tag{2}$$

Sowohl die Anzahl der Amplitudenstufen als auch deren Intervallbreite sind abhängig von der Wahrscheinlichkeitsdichte des Gesamtausgangssignals des Systems, also vom Meßwert. Da nur ganzzahlige Amplitudenstufen in Gl. (1) technisch möglich sind, werden Valenzklassen (Symbol [...]) eingeführt, d. h., die nächsthöhere ganze Zahl n_v ist an Amplitudenstufen zugrunde zu legen

$$n_v = \left[\sqrt{K \frac{\overline{z_a^2(t)}}{\overline{\varepsilon^2(t, \tau)}}}\right]. \tag{3}$$

Als Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Meßwerten in einem beliebigen Intervall folgt aus den Gln. (2) und (3)

$$W[z_{a_{\nu-1}} < z_a(t) \leqq z_{a_\nu}] = \frac{1}{n_v} = \int_{z_{a_{\nu-1}}}^{z_{a_\nu}} p(z_a)\,\mathrm{d}z_a\,. \tag{4}$$

Bei gemessener Dichte $p(z_a)$ des Ausgangssignals (Meßwertes) $z_a(t)$ sowie bekannter Stufung n_v können damit die Quantisierungswerte (Schwellwerte $z_{a_{\nu-1}}$, z_{a_ν}) von $z_a(t)$ ermittelt werden.

3. Grenze der Meßgenauigkeit

Ausgangspunkt zur Ermittlung der Meßgenauigkeit nach den Gln. (1) und (2) ist die über das System übertragene Information, die Transinformation [2]

$$H(n_e, \tau; z_a) = \mathrm{lb} \sqrt{K \frac{\overline{z_a^2(t)}}{\overline{\varepsilon^2(t,\tau)}}}, \tag{5}$$

womit unmittelbar daraus die Anzahl der Amplitudenstufen bestimmt (Gl. (1)) und die bei einem beliebigen analogen System notwendige Meßgenauigkeit ermittelt werden kann.

Davon ausgehend gelangt man physikalisch anschaulich auf der Grundlage der statistischen Informationstheorie zum optimalen System, wenn bei gegebenen Eingangssignalen eine Systemoptimierung (Korrektur) derart vorgenommen wird, daß sich der Maximalwert der Transinformation nach Gl. (5) ergibt:

$$H_e(n, \tau; z_a)_{\max} = \frac{1}{2} \mathrm{lb} \left[K \frac{\overline{z_a^2(t)}}{\overline{\varepsilon^2(t,\tau)}} \right]_{\max}. \tag{6}$$

Da die Transinformation $H(n_e, \tau; z_a)_{\max}$ die Information darstellt, die bei gegebenen Eingangssignalen maximal im Ausgangssignal (Meßwert) bezüglich des Eingangsnutzsignals (Meßgröße) enthalten ist, tritt bei einem derart dimensionierten System die Grenze der möglichen Meßgenauigkeit auf. Eine genauere Meßwerterfassung bringt keinen Informationsgewinn, jedoch tritt ein Informationsverlust bei größeren Intervallbreiten auf.

Durch gleichzeitige Einführung von Valenzklassen entsprechend Gl. (3) folgt

$$n_{v\max} = \left[\sqrt{K \frac{\overline{z_a^2(t)}}{\overline{\varepsilon^2(t,\tau)}}} \Bigg|_{\max} \right] \tag{7}$$

und als Zusammenhang zwischen Anzahl der Amplitudenstufen und Intervallbreiten

$$\frac{1}{n_{v\max}} = \int_{z_{a_{\nu-1}}}^{z_{a_\nu}} p(z_a)\, dz_a . \tag{8}$$

Zur Realisierung der Optimierung lassen sich verschiedene technische Anordnungen benutzen [2] und [3]:

- Korrektur durch ein nachgeschaltetes Netzwerk
- Zugrundelegung eines Regelkreises
- Einsatz eines Rechners (Mikrorechner, Kleinrechner), der durch entsprechende Programmierung die Korrektur realisiert.

Während für praktische Fälle die Annahme einer Gauß-Verteilung für das Störsignal mit ausreichender Näherung meist möglich ist, ist eine solche Voraussetzung für die Meßgröße zu speziell. Zur Ermittlung von Grenzwerten wird im folgenden dennoch diese Annahme getroffen. Man erhält für die maximal übertragbare Information bei statistischer Unabhängigkeit der Eingangssignale [2]

$$\left. \frac{\overline{\varepsilon^2(t,\tau)}}{\overline{z_a^2(t)}} \right|_{\min} = \frac{\int_0^\infty \frac{P_{n_e}(\omega) \cdot P_{r_e}(\omega)}{P_{n_e}(\omega) + P_{r_e}(\omega)} d\omega}{\int_0^\infty P_{n_e}(\omega)\, d\omega} \tag{9}$$

$K = 1$

sowie für die Grenze der Meßgenauigkeit bei gestörten Systemen unter Berücksichtigung der Valenzklassen

$$\int_{z_{a_{\nu-1}}}^{z_{a_\nu}} p(z_a)\, dz_a = \frac{1}{\left[\sqrt{\frac{\int P_{n_e}\, d\omega}{\int \frac{P_{n_e} P_{r_e}}{P_{n_e} + P_{r_e}} d\omega}} \right]}. \tag{10}$$

Damit folgt:

- Gleichung (10) legt die maximal erreichbare Meßgenauigkeit bei gestörten Systemen fest, wobei für die Eingangssignale die Gaußsche Verteilung zugrunde gelegt ist. Eine genauere Messung (Quantisierung) als durch Gl. (10) vorgeschrieben wird ist nicht erforderlich.
- Bei fehlendem Störsignal liegt die Grenze bei unendlich vielen Amplitudenstufen n_v (keine Quantisierung möglich, jeder Wert des analogen Signals muß erfaßt werden, d. h. bei Intervallbreiten $z_{a_{\nu-1}} \dots z_{a_\nu} = 0$).
- Da Gl. (10) eine Grenze für die mögliche Meßgenauigkeit darstellt und dieser Wert nur unter optimalen Voraussetzungen erreichbar ist, muß stets von einer geringeren Anzahl von Meßwertstufen ausgegangen werden.
- Anhand praktisch wichtiger Beispiele können Abschätzungen und eventuelle Verallgemeinerungen zur Grenze der Meßgenauigkeit bei gestörten Übertragungssystemen getroffen werden.

4. Beispiele

4.1. Grafische Ermittlung der Meßgenauigkeit

Für die Gauß- und Gleichverteilungsdichte $p(z_a)$ des Meßwertes ist die erforderliche Meßgenauigkeit bei $n_v = 10$ Amplitudenstufen grafisch zu ermitteln. Die Lösung ist im Bild 2 angegeben.

4.2. Grenze der Meßgenauigkeit

Am Eingang eines gestörten Meßinformationssystems (Übertragungssystem einschließlich Meßsystem) liege ein Gauß-verteiltes Nutzsignal mit der spektralen Leistungsdichte

$$P_{n_e}(\omega) = P_{n_{e0}} \frac{1}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \tag{11a}$$

sowie ein Gauß-verteiltes Störsignal mit

$$P_{r_e}(\omega) = P_{r_{e0}} \tag{11b}$$

an. Es sind die Grenzen der Meßgenauigkeit zu ermitteln, wenn durch Systemkorrektur eine Optimierung vorgenommen wird. Wie in [2] gezeigt wird, erhält man unter Berücksichtigung der physikalischen Realisierbarkeit des gesamten Übertragungssystems den normierten Übertragungsfehler

$$\left. \frac{\overline{\varepsilon^2(t,\tau)}}{\overline{z_a^2(t)}} \right|_{\min_{\text{real}}} = 1 - \frac{P_{n_{e0}}/P_{r_{e0}}}{\left(1 + \sqrt{1 + P_{n_{e0}}/P_{r_{e0}}}\right)^2} \tag{12}$$

bzw. mit Gl. (7) für die Anzahl der Amplitudenstufen

$$n_{v_{\max_{\text{real}}}} = \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{P_{n_{e0}}/P_{r_{e0}}}{\left[1 + \sqrt{1 + P_{n_{e0}}/P_{r_{e0}}}\right]^2}}} \right], \tag{13}$$

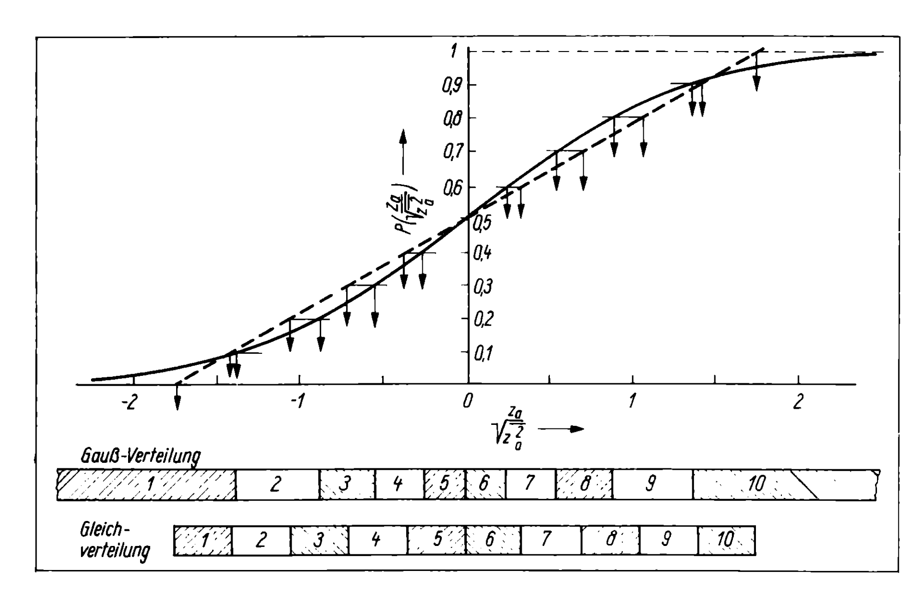


Bild 2. Grafische Ermittlung der normierten Intervallbreiten der Amplitudenstufen bei Gauß- und Gleichverteilungsdichte

$p(z_a)$ des Meßwertes $z_a(t)$, wenn $n_v = 10$ Amplitudenstufen vorliegen

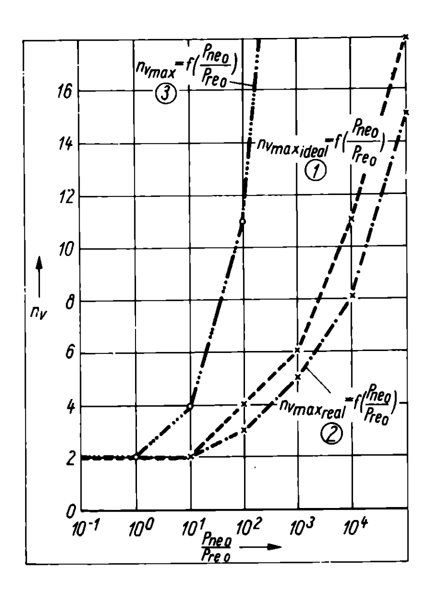


Bild 3. Anzahl der Amplitudenstufen $n_{v\,max}$ in Abhängigkeit des Nutz/Rausch-Verhältnisses $P_{n_{e0}}/P_{r_{e0}}$ bei Optimierung für die spektralen Leistungsdichten

a) $P_{n_e}(\omega) = P_{n_{e0}} \frac{1}{1 + (\omega/\omega_0)^2}$;

$P_{r_e}(\omega) = P_{r_{e0}}$: Kurven 1 und 2

b) $P_{n_e}(\omega) = P_{n_{e0}}$; $P_{r_e}(\omega) = P_{r_{e0}}$: Kurve 3

während für das physikalisch nicht realisierbare System mit Gl. (9) unmittelbar folgt

$$\left.\frac{\overline{\varepsilon^2(t,\tau)}}{\overline{z_a^2(t)}}\right|_{\min_{\text{ideal}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{P_{n_{e0}}}{P_{r_{e0}}}}} \tag{14}$$

bzw.

$$n_{v_{\max_{\text{ideal}}}} = \left[\sqrt{\left.\frac{\overline{z_a^2(t)}}{\overline{\varepsilon^2(t,\tau)}}\right|_{\max_{\text{ideal}}}}\right]. \tag{15}$$

Als Zusammenhang zwischen Anzahl der Amplitudenstufen und Intervallbreite ergibt sich

$$\frac{1}{n_{v_{\max}}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\,\overline{z_a^2(t)}}} \int_{z_{a_{v-1}}}^{z_{a_v}} e^{-\frac{z_a^2}{2\overline{z_a^2}}}\, dz_a\,. \tag{16}$$

Die Gleichungen (13), (15) und (16) bestimmen somit für das angenommene Beispiel die Grenzen der Meßgenauigkeit bei Optimierung. Die Ergebnisse sind im Bild 3 grafisch dargestellt (Kurven *1* und *2*).

Als Grenzfall werden (innerhalb eines bestimmten Frequenzbereiches) im folgenden Beispiel als spektrale Leistungsdichten angenommen, wobei gleichfalls eine Gauß-Verteilung der Signale zugrunde gelegt wird:

$$\left.\begin{aligned} P_{n_e}(\omega) &= P_{n_{e0}}\,, \\ P_{r_e}(\omega) &= P_{r_{e0}}\,. \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

Aus Bild 3 (Kurve 3) folgt damit

$$n_{v_{\max}} = \left[\sqrt{1 + \frac{P_{n_{e0}}}{P_{r_{e0}}}}\right]. \tag{18}$$

5. Schlußfolgerungen

Die angenommenen spektralen Leistungsdichten für das Nutzsignal stellen gewisse Grenzfälle dar, innerhalb derer typische Anwendungsfälle liegen. Da für das Störsignal die charakteristische konstante spektrale Leistungsdichte zugrunde gelegt wurde, können die Ergebnisse des Bildes 3 für Näherungsbetrachtungen verallgemeinert werden, auch wenn hierbei für Nutz- und Störsignal eine Gauß-Verteilung vorausgesetzt wurde.

Bei relativ großen Störungen (bis etwa $P_{n_{e0}}/P_{r_{e0}} \leqq 10$) genügen bereits $n_v = 2 \ldots 4$ Quantisierungsintervalle, um einen Informationsverlust zu vermeiden. Für $P_{n_{e0}}/P_{r_{e0}} = 10 \ldots 10^3$ stellen etwa 10 Amplitudenstufen (s. Bild 2) die Grenzen der Meßgenauigkeit dar. Eine genauere Meßwerterfassung ist nicht erforderlich.

Im Sinne der Informationstheorie läßt sich gleichfalls die Aufgabe behandeln, in welchen äquidistanten Zeitabständen t_A der Signalwert von $z_a(t)$ zu bestimmen ist, um einen Informationsverlust zu vermeiden. In Erweiterung des klassischen Abtasttheorems erhält man hierbei das auch physikalisch anschauliche Ergebnis, daß die Abtastzeit i. allg. vom Signal/Rausch-Verhältnis abhängig ist [2]. So ergibt sich z. B.

– für $P_{n_e}(\omega) = P_{n_{e0}} \frac{1}{1 + (\omega/\omega_0)^2}$, $P_{r_e}(\omega) = P_{r_{e0}}$:

Mit steigendem $P_{n_{e0}}/P_{r_{e0}}$ sinkt die erforderliche Abtastzeit, insbesondere folgt für $P_{n_{e0}}/P_{r_{e0}} \to \infty$; $t_A \to 0$

– für $P_{n_e}(\omega) = P_{n_{e0}}$, $P_{r_e}(\omega) = P_{r_{e0}}$ im angenommenen Frequenzbereich $0 < \omega \leqq \omega_g$: $t_A \leqq \frac{1}{2 f_g}$.

Nur für diesen Fall ergibt sich Übereinstimmung mit dem klassischen Kotelnikov-Theorem.

Literatur

[1] *Krauß, M.:* Zur erforderlichen Meßgenauigkeit bei gestörten Übertragungssystemen. msr 17 (1974) H. 7, S. 240–242.

[2] *Krauß, M.; Woschni E.-G.:* Meßinformationssysteme. 2. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik 1975.

[3] *Woschni, E.-G.:* Informationstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1973.

msr 6741

Dr. sc. techn. *H. Gatzmanga*, Köthen[1])

Automatische Überwachung prozeßanalytischer Meßeinrichtungen und Anlagen

IA3.2

Einleitung

Die wachsenden Anforderungen an die Qualitätssicherung industriell erzeugter Produkte, verbesserte Prozeßsteuerungen und sicherheitstechnische Aspekte erfordern den steigenden Einsatz prozeßanalytischer Meßeinrichtungen.
Aus diesem Trend folgt eine überproportionale Steigerung des Arbeitszeitaufwandes für die automatisierungstechnischen Bereiche der Betriebe, da Prozeßmeßeinrichtungen der Analytik einen hohen vorbeugenden Wartungsaufwand erfordern. Dies ist bedingt durch die Komplexität der angewandten Meßverfahren, die den Einrichtungen vorgeschalteten Probenaufbereitungen und die geringen Nutzsignal-Störsignalquotienten in der Meßgrößenumformung.
So sind eintägige Wartungsrhythmen der vorbeugenden Instandhaltung mit einem Zeitaufwand von 60 bis 250 h/Jahr an einem Gerät einrichtungsbezogene Durchschnittswerte an einer eingelaufenen Meßanlage. Daneben sind 40—50 h Reparaturzeit für ein Gerät im Jahr einzuplanen.

Um einen Abbau der Wartungszeiten, Reparaturzeiten und der täglichen Überwachung der Prozeßanalysatoren zu erreichen, werden folgende Wege beschritten:

- Funktionssignalisierung der Prozeßanalysatoren
- diskrete Einflußgrößensignalisierung auf separaten Ausgabekanälen
- analoge Einflußgrößensignalisierung
- Empfindlichkeitssignalisierung durch externe Steuereinrichtungen
- Empfindlichkeitsregelung durch externe Korrektureinrichtungen
- Empfindlichkeitsregelung durch interne Korrektureinrichtungen
- Plausibilitätskontrolle durch rechnergesteuerte Anlagenüberwachung
- wartungsarme Analysenmeßanlagen.

1. Funktions- und Einflußgrößensignalisierung in Prozeßanalysatoren

1.1. Funktionssignalisierung

Die einfachste Form der Überwachung von Prozeßanalysatoren stellt die Funktionssignalisierung dar. Sie ist nicht mit einer Empfindlichkeitskontrolle gekoppelt und wird durch ein internes und externes Live-zero-Signal im Ausgangssignal realisiert. Seine Wirkungsweise soll am Beispiel typischer Fotometer und Wärmeleitgeräte gezeigt werden. Die Funktion eines Fotometers wird durch die Meßgrößenumformung, die Signalverarbeitung und die Spannungsversorgung gesichert. Im Anwendungsfall der Gaseinbruchskontrolle, insbesondere bei der Ex-Gefährdungsüberwachung, beträgt die Anzeige des Analysators im Betriebszustand Null. Um die Anzeige Null vom Funktionsausfall der Meßgrößenumformung unterscheiden zu können, wird in Zweistrahlfotometern eine solche Verstimmung vorgenommen (z. B. mit Betragsblenden), daß bei der Konzentration der Meßkomponente Null ein Abbildungssignal erscheint, das ungleich von Null ist und im Ausgang der Meßeinrichtung einen positiven Ausschlag hervorruft. Dieser wird durch ein elektrisches Konstantsignal aufgehoben. Damit tritt beim Funktionsausfall der Meßgrößenumformung oder der Signalverarbeitung ein weit unter dem Nullpunkt liegendes Signal auf (Bild 1).
Das sogenannte interne Live-zero-Signal zeigt den Funktionsausfall des Meßgrößenumformers oder der Signalverarbeitung an, ohne daß ein Spannungstotalausfall im Prozeßanalysator und Leitungsbruch zur Auswerteeinheit erkannt wird. Dies kann durch Ausnutzung des Einheitssignals 4—20 mA als externes Live-zero-Signal realisiert werden, da Leitungsbrüche und Spannungsausfall das Ausgangssignal unter 4 mA absenken.

Diese Methode der Funktionskontrolle läßt sich prinzipiell auf alle Analysatoren übertragen, die mit physikalischen Effekten arbeiten, deren Kennfunktionen Vorlasten aufweisen. So können Wärmeleitgeräte und thermomagnetische Analysatoren durch vorverstimmte Wheatstone-Brücken mit anschließender elektrischer Kompensation der Vorverstimmung ebenfalls mit einem internen Live-zero-Signal ausgerüstet werden, das durch einen nachfolgenden Spannungs/Strom-Wandler um das externe Live-zero-Signal 4—20 mA ergänzt wird.

1.2. Einflußgrößensignalisierung

Eine qualitativ bessere Überwachung eines Prozeßanalysators als durch die Live-zero-Signalisierung erfolgt mit dem Einsatz von Statussensoren. Statussensoren überwachen die wichtigsten Parameter eines Analysators und signalisieren deren Abweichung vom Arbeitspunkt durch diskrete und teilweise analoge Signale an der Meßeinrichtung. Bei der Funktionskontrolle über eine zentrale Warte oder einen Rechner werden jedoch alle Statuswerte auf L/0-Aussagen reduziert.

Übliche Statuswerte sind:

- Meßkomponentendurchfluß, der durch Schwebekörpermesser im Prozeßanalysator angezeigt und über Grenzkontaktsignalisierung binär kodiert wird
- Temperatur im Thermostaten, die durch Thermistor-Triggerschaltungen signalisiert wird
- Speisespannungen des Meßgrößenumformers
- Speisespannungen der Signalverarbeitung
- Verschmutzung der Meßstoffleitungen durch Messung der Druckdifferenz am Feinfilter im Prozeßanalysator

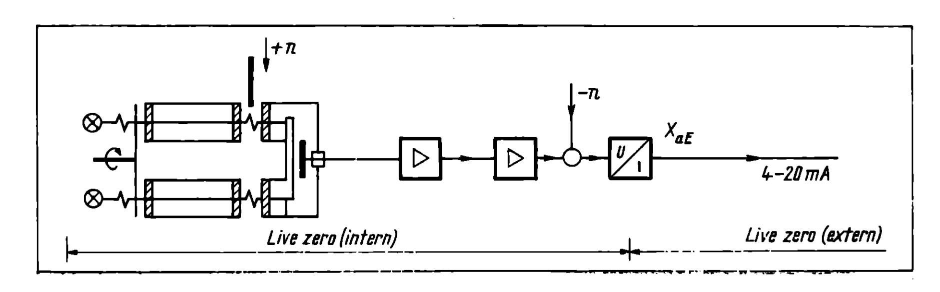


Bild 1. Infrarotanalysator mit Funktionssignalisierung

[1]) Mitteilung aus der IH Köthen.

Tafel. Störungssignalisierung durch Statussignale

Gasanalysator	Statussignal
Ultramat 3	1. Abweichungen der stabilisierten Spannungen 2. Abweichungen der Blendenraddrehzahl 3. Abweichung des Strahlerstromes 4. Abweichung der Temperatur des Analysierteils 5. Abgleichbereich des automatischen Nullpunktstellers 6. Abgleichbereich des automatischen Empfindlichkeitsstellers 7. Gasdurchfluß zu klein oder zu groß 8. Kondensat in der Ausgangsleitung

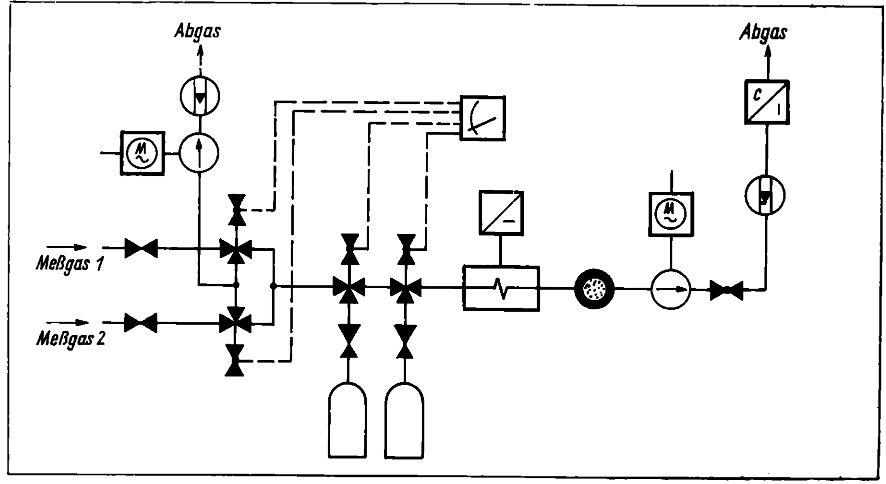


Bild 3. Analysator mit Gasumschalteinrichtung zur Empfindlichkeits- und Nullpunktko ntrolle

– Ausfälle von Reagenzien oder Spülmitteln
– Ausfälle von Kalibriergasen.

Als Beispiel für die Überwachung von Analysatoren mit Statussensoren sei der Infrarotanalysator Ultramat 3 angeführt [1] (Tafel). Die Statussignale werden im Ultramat 3 über eine zweireihige Signallampenleiste zur Anzeige gebracht. Die Gewinnung analoger Statussignale hat sich nur für wenige, analysatortypische Parameter durchgesetzt, wobei die Anzeige örtlich erfolgt, da die zentrale Erfassung eine nicht mehr zu bewältigende Informationsflut hervorruft. Als Beispiel sei die Verschmutzungskontrolle bei einem Fotometer (LUMOLYT) gezeigt [2] (Bild 2).
Das Fotometer arbeitet nach dem Pilotverfahren, wobei die Fotozellen mit gegenphasigen Wechselspannungen betrieben werden, um eine Kanalkennung zu erreichen. Beide Fotozellen sind mit einem gemeinsamen Arbeitswiderstand verbunden. Durch einen internen Regelkreis, dessen Regelgröße die Amplitude der Spannung des Pilotkanals ist, wird das Übertragungsverhalten der Meßeinrichtung weitgehend konstant gehalten. Stellglied des internen Regelkreises ist ein steuerbarer Verstärker, der die Signale des Pilot- und Meßkanals verarbeitet. Der Wert der Stellgröße wird angezeigt und ist ein Maß für die Küvettenverschmutzung bzw. Baugruppenalterung.

2. Empfindlichkeitssignalisierung durch externe Steuereinrichtungen

Eine Vielzahl konventioneller Prozeßanalysatoren ist noch nicht mit Einflußgrößensignalisierungen ausgerüstet. Um auch bei

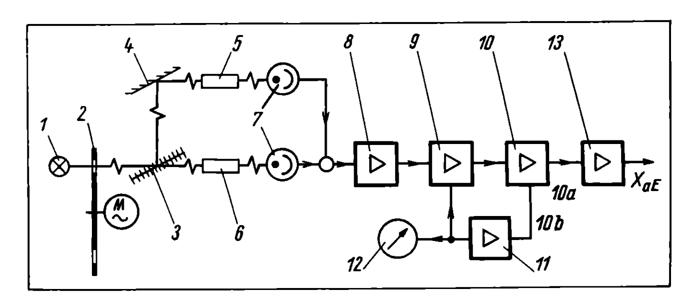


Bild 2. Fotometer mit analogem Statussignal

1 Strahler; *2* Rotierende Lochblende; *3* Halbdurchlässiger Spiegel; *4* Spiegel; *5* Vergleichsküvette; *6* Meßküvette; *7* Fotozellen; *8* Vorverstärker; *9* Steuerbarer Verstärker; *10* Signaltrennung; 10a Meßsignal; *10*b Vergleichssignal; *11* Regelverstärker; *12* Anzeigeinstrument Stellgröße; *13* Ausgangssignalverstärker

diesen Analysatoren eine Empfindlichkeits- und Nullpunktkontrolle durchführen zu können, wird dem Prozeßanalysator eine Gasumschalteinrichtung vorgeschaltet, die dem Analysator neben dem Meßgas auch Kalibriergas zuführt (Bild 3).
Mehrfachschreiber zur Registrierung der Ausgangssignale zeichnen damit neben den Meßwerten auch die Nullpunkt- und Empfindlichkeitsänderungen auf.

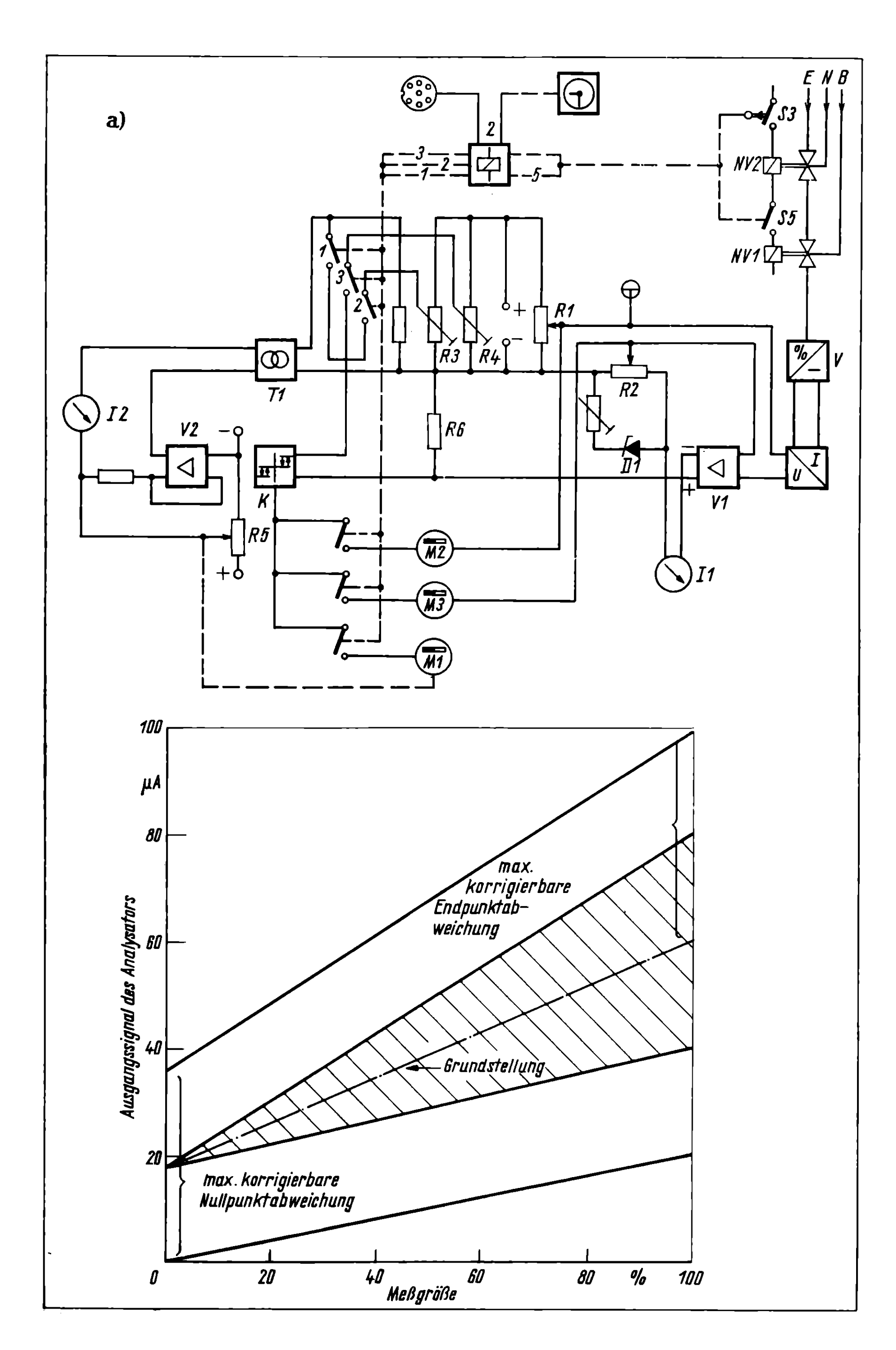
3. Empfindlichkeitsregelung durch externe Korrektureinrichtungen

Die Empfindlichkeitssignalisierung durch externe Steuereinrichtungen von Prozeßanalysatoren erfordert einen hohen ökonomischen Aufwand, ohne daß die Wartungsarmut und die Genauigkeit der Messung verbessert wird. Aus diesem Grund ist es zweckmäßiger, die Langzeitfehler und die Reproduzierbarkeit der Meßwerte nicht nur zu signalisieren, sondern durch Korrektureinrichtungen zu beheben. Als Beispiel sei der CMR-Meßumformer mit automatischem Abgleich angeführt [3]. Es handelt sich hierbei um eine Einrichtung, die dem Analysator selbsttätig in wählbaren Zeitabständen über ein Programmschaltwerk, das Magnetventile steuert, Kalibriergase zuführt (Bild 4).
Der Sollwert-Istwertvergleich erfolgt mit Testgasen für den Nullpunkt und die Empfindlichkeit.
Mit der vorgestellten Einrichtung können Nullpunktverschiebungen von $\pm 18\%$ und Empfindlichkeitskorrekturen von $\pm 20\%$ vom Meßbereich vorgenommen werden. Während des Abgleichvorganges wird der Meßwert über Motorpotentiometer gespeichert. Die Dauer des Abgleichvorganges beträgt 5 min. Bei dem Betrieb eines Analysators mit einer externen Steuereinheit, wie sie hier vorgestellt wurde, ist eine Korrektur nur begrenzt möglich, da Eingriffe in den Meßgrößenumformer nicht erfolgen und damit Arbeitspunktverschiebungen im Meßgrößenumformer nicht beseitigt werden können.

4. Empfindlichkeitsregelung durch interne Korrektureinrichtungen

Die bisher gezeigten Methoden der Selbstüberwachung von Prozeßanalysatoren beruhten auf der Gewinnung interner Statussignale oder der externen Korrektur der vom Analysator ausgegebenen Signale. Dabei können selbst mit der letzteren Methode nur begrenzte Erfolge erzielt werden, da die Korrektur weder in Meßgrößenumformer noch in der Signalverarbeitung erfolgt. Aus diesem Grund wird zunehmend versucht, die Selbst-

Bild 4. Externe Selbstkorrektureinrichtung für Analysator



korrektur intern vorzunehmen und das Übertragungsverhalten der Gesamteinrichtung zu stabilisieren [1]. Eine interne automatische Selbstüberwachung weist der Infrarotanalysator Ultramat 3 auf. Hier werden von Hand oder über Programmgeber Testgase für den Nullpunkt und die Empfindlichkeit eingeleitet und damit das Gerät kalibriert. Von besonderem Vorteil ist es, daß der Eingriff direkt in der Meßinformationsgewinnung erfolgt, so daß interne Signale mit hohen Vorlastanteilen vermieden werden (Bild 5).

Die Selbstkorrektur in Analysatoren erfordert nach der gezeigten Methode 2 Testgase zur Kalibrierung. Ziel muß es sein, die Prüf- und Korrekturzeit der Analysatoren, in denen nur gespeicherte Meßwerte zur Verfügung stehen, zu senken. Eine Möglichkeit hierfür ist die Nutzung eines solchen Meßverfahrens, das mit einer Korrektur auskommt. So wird bei dem im Bild 6 gezeigten Fotometer nur ein Nullpunktabgleich benötigt, der periodisch mit einem Hilfsgas (Luft) erfolgt. Über ein Motorpotentiometer wird eine elektrische Vorlastkorrektur herbeigeführt, die durch einen Programmgeber geschaltet wird. Auch bei diesem Gerät werden zusätzlich Statussigale ausgegeben, die die wichtigsten Einflußgrößen überwachen. Ein in der Gasanalysenmeßtechnik prinzipiell neuer Weg der Selbstüberwachung wurde bei dem Infrarotanalysator Binos 1 eingeschlagen. Hier wird eine Internkorrektur angewandt, die ohne Prüfgase auskommt und eine Empfindlichkeitsregelung beinhaltet [5].

Der Infrarotanalysator hat einen Infrarotstrahler, dessen Strahlung nach Durchlaufen einer Meß- und Vergleichsküvette gegenphasig moduliert wird und in einem Strahlungsempfänger mit Mikroströmungsfühler absorbiert wird (Bild 7). Die Modulationsfrequenz beträgt 215 Hz. Sie ist so hoch, daß während eines Umlaufs der Modulationsscheibe zweimal Prüfsignale für eine Internregelung der Empfindlichkeit der Meßeinrichtung gewonnen werden können.

Durch eine definierte Querschnittsöffnung und Querschnittsverengung der Modulationsscheibe wird 1/4 und danach 3/4 der gesamten Strahlung dem Empfänger zugeführt. Die Prüfsignale werden in den Teilen der Modulationsscheibe kodiert, in denen die gegenphasige Modulation unterbrochen ist (Bild 8). Die Signale der Prüfperiode werden in einem Internregler weiterverarbeitet

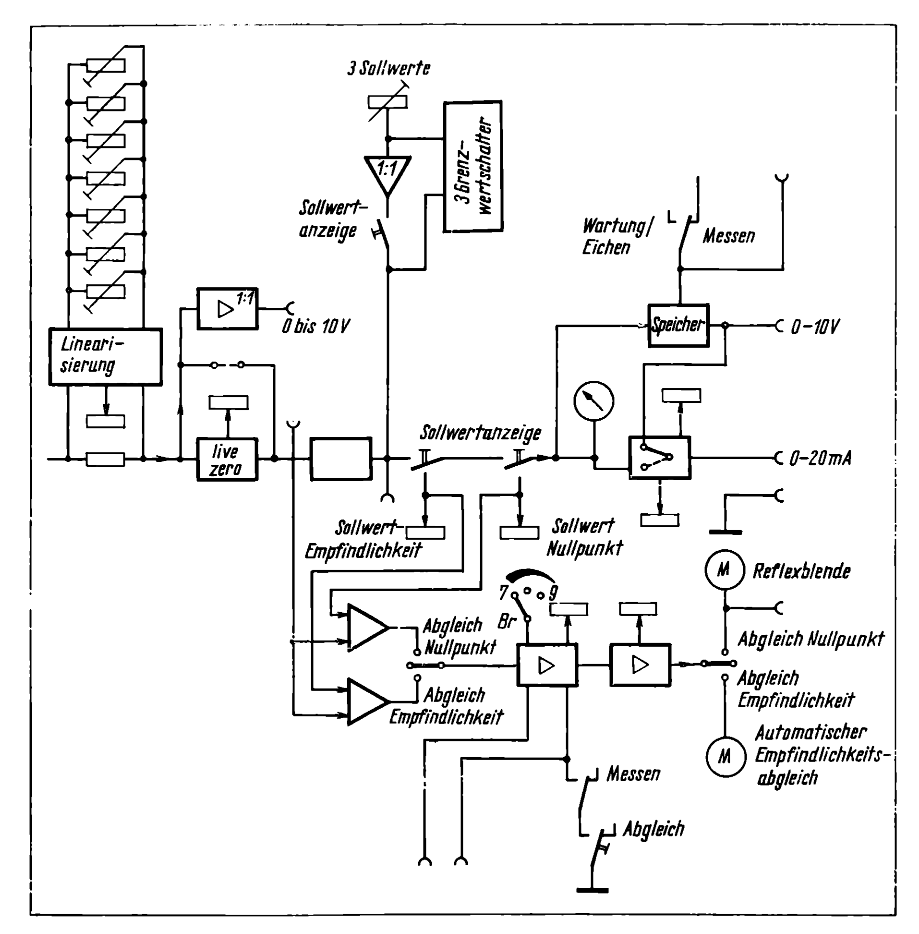


Bild 5. Interne Selbstkorrektur beim Ultramat 3

Bild 7. IR-Analysator Binos 1

1 Infrarot-Strahler; *2* Reflektor; *3* Meßküvette; *4* Küvetten-Meßseite; *5* Küvetten-Vergleichsseite; *6* Filterküvette; *7* Modulationsblende; *8* Strahlungsempfänger; *9* Adsorptions-Kammer; *10* Ausgleichs-Kammer; *11* Strömungsfühler; *12* Signalverarbeitung; *13* Anzeigeinstrument; *14* Wirbelstromantrieb

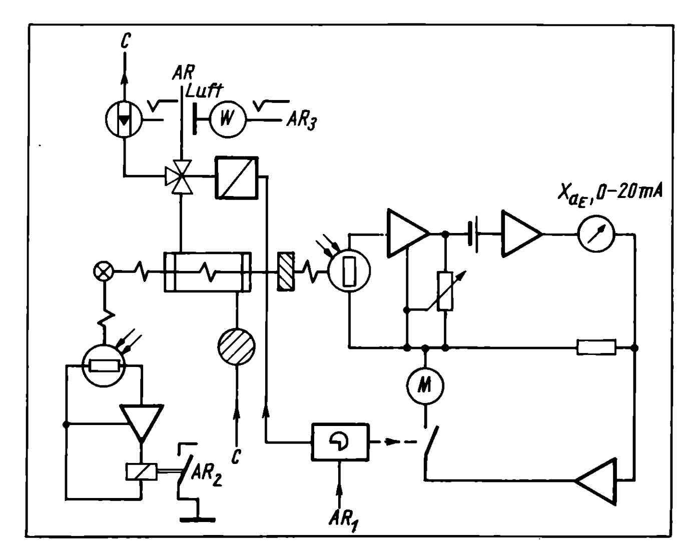


Bild 6. Analysator mit interner Nullpunktkorrektur

AR Analysenrechner; *C* Meßsignaleingang

und steuern den Übertragungsfaktor der Bauglieder der Meßinformationsgewinnung. Mit der beschriebenen Selbstkorrektur ist es möglich, die Empfindlichkeitsdrift auf Werte unter 0,3%/Woche zu reduzieren. Die Nullpunktdrift hat dagegen den für die Gerätegruppe typischen Wert von 2%/Woche.

5. Selbstüberwachung von Analysenmeßanlagen

Die gezeigten Methoden der Funktions- und Einflußgrößensignalisierung sowie der Selbstkorrektur von Prozeßanalysatoren senken den Wartungsaufwand nicht ausreichend, da die Genauigkeit und die Reproduzierbarkeit des Meßwertes für den Prozeßanalysator abgeschätzt werden kann, nicht jedoch für die Analysenmeßanlage.

Die Ausweitung der beschriebenen Wege der Statussignalisierung und Selbstkorrektur auf die Analysenmeßanlage stellt nur selten das technisch ökonomische Optimum eines spezifischen Anwendungsfalles dar. Es ist vielmehr erforderlich, den Anteil wartungsarmer Armaturen und Baugruppen einer Anlage zu erhöhen und die verbleibenden Einrichtungen zu überwachen und zu korrigieren. Die in Analysenmeßanlagen beschrittenen Wege lassen sich auf folgende Grundvarianten reduzieren:

- wartungsintensive Armaturen der Entnahmeeinrichtungen werden doppelt ausgelegt
- wartungsintensive Aufbereitungseinrichtungen werden doppelt ausgelegt
- Statussensoren werden in die Aufbereitungsarmaturen eingebaut
- Analysenmeßanlage wird durch Kleinrechner überwacht
- Störgrößen werden durch Steuer- und Regelschaltungen korrigiert.

Die genannten Varianten werden nicht separat nebeneinander verwirklicht, sondern üblicherweise miteinander kombiniert. Eine der Möglichkeiten stellt die Kombination selbstreinigender Aufbereitungsarmaturen mit Statussensoren dar [4].

In der im Bild 9 gezeigten Anlage wird zugunsten einer zyklischen Ausblasung der Sonde auf wartungsintensive Filter an den Entnahmeeinrichtungen verzichtet. Auch die Grobfilterung mit Kondensatabscheidung ist durch eine Naßwäsche mit Tauchglockenabscheider ersetzt, wobei die Förderung mit einer Strahlrohrpumpe erfolgt und das Kondensat sowie das Spülmittel kontinuierlich abgeführt werden.

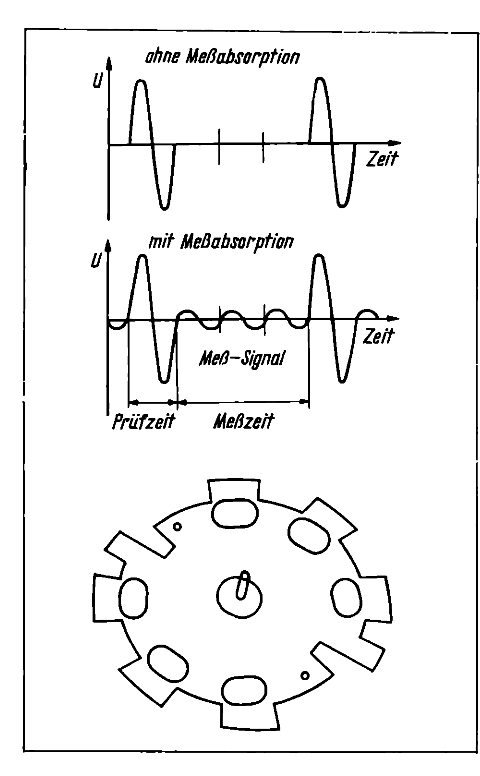
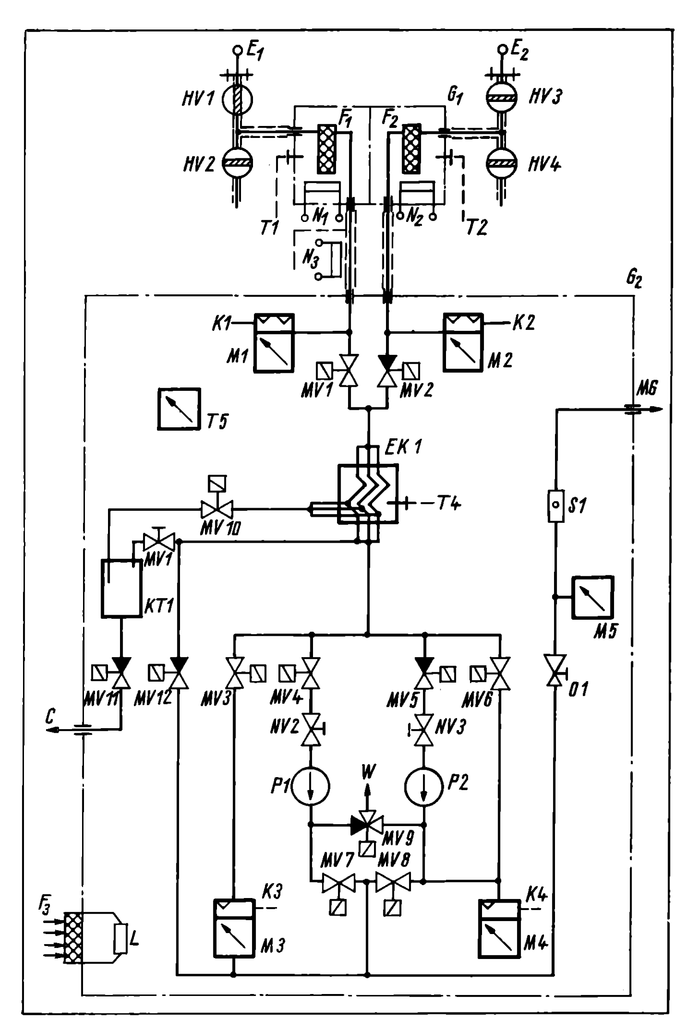
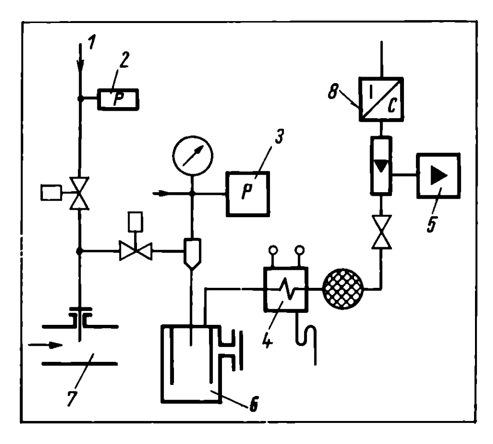


Bild 8. Interne Selbstkorrektur beim IR-Analysator Binos 1

Verlauf der Signalspannung hinter dem Verstärkungsregler ◄

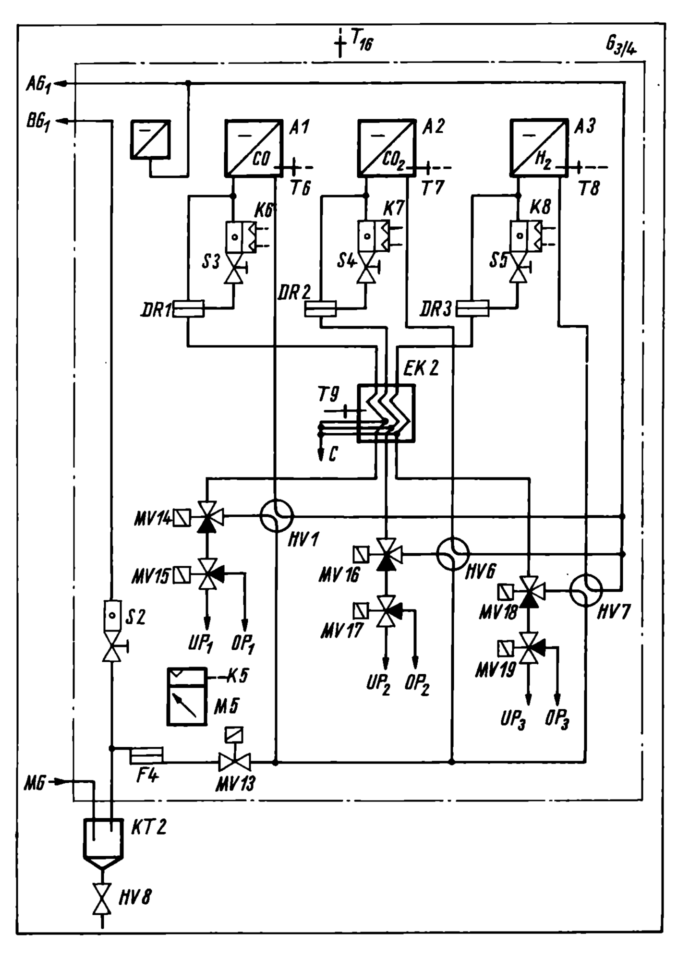


► **Bild 10. Wartungsarme Mehrfachanalysenanlage-Probenaufbereitung**



◄ **Bild 9. Wartungsarme Analysenmeßanlage**

1 Preßluft, *2*, *3* Programmschalter; *4* Kühler; *5* Durchflußsignalisierung; *6* Wartungsarmer Abscheider; *7* Entnahmestelle; *8* Analysator



► **Bild 11. Wartungsarme Mehrfachanalysenanlage-Probenfeinaufbereitung und Analysator**

Eine weitere Variante der Realisierung wartungsarmer Analysenmeßanlagen, die mit Kleinrechnern kombiniert werden können, zeigt Bild 10 [6]. Es handelt sich hierbei um eine Gasanalysenmeßanlage für rechnergesteuerte Hochöfen. Von den zwei Entnahmesonden E, die parallel geschaltet sind, ist jeweils eine in Funktion. Bei einer Verstopfung der Sonde wird ein Statussignal vom Kontaktmanometer $M1$ ausgelöst und die Entnahme auf die zweite Sonde umgeschaltet. Zur Verhinderung von Taupunktunterschreitungen am Filter $F1/2$ wird das Filtergehäuse $G1$ elektrisch beheizt. Temperatursensoren $T1/2$ überwachen hierbei die Heizungen. Die Membrankompressoren $P1/2$ werden über Maximum-Grenzwertschalter, die sich an den Manometern $M1/2$ befinden, ausgeschaltet.

Die weitere Aufbereitung des Meßgases erfolgt in einer von der ersten Meßgasaufbereitung getrennten Anlage (Bild 11). Im Eingang befindet sich ein Kondensattopf $KT2$, dem eine Meßgasteilung folgt, wobei der Analysatorteil im Bypass betrieben wird. Das Meßgas wird über das Feinfilter $F4$, das Manometer $M5$ und das Sicherheitsmagnetventil sowie dem Meßgaskühler $EK2$ den Analysatoren zugeführt. Diese sind mit der üblichen Feinfilterung und kontaktbehafteten Strömungsmessern ausgestattet. Zusätzliche Sensoren messen die Temperatur im Analysator und im Meßschrank. Die zur Nullpunkt- und Empfindlichkeitskontrolle eingesetzten Prüfgasflaschen sind ebenfalls mit Fülldrucksensoren ausgerüstet.

Bemerkenswert ist die Meßstelle $E8$. Sie dient als Lecksuchsonde und ist deshalb über eine flexible Schlauchleitung frei beweglich montiert.

Die gesamte Anlage ist mit einem Kleinrechner gekoppelt und löst nach Angaben des Herstellers folgende Aufgaben [6]:

1. Überwachung der Statussensoren
2. Alarmausdruck
3. Diskrete Meßwertabfrage
4. Plausibilitätskontrolle
5. Störgrößenkorrektur der Ausgangssignale
6. Empfindlichkeits- und Nullpunktkorrektur der Ausgangssignale
7. Mittelwertbildung
8. Selbsttätig Prüfvorgänge und Prüfkorrekturen einleiten
9. Programmänderung und Programmabbruch über Eingriffe und Information am Rechner.

Die Einschaltung eines Rechners in die Überwachung einer Analysenmeßanlage ermöglicht nicht nur die Selbstkorrektur der Analysatoren, sondern läßt erstmalig Plausibilitätsaussagen über die Richtigkeit der ausgeworfenen Meßwerte zu, da bei einer meßtechnischen Überwachung einer verfahrenstechnischen Anlage jedem Meßwert, bei Kenntnis der übrigen Werte eine meßstellenspezifische Wahrscheinlichkeit seines Auftretens innerhalb bestimmter Toleranzgrenzen zugeordnet werden kann.

Zusammenfassung

Die Anwenderforderungen nach wartungsarmen genauen Prozeßanalysatoren und Analysenmeßanlagen werden in zunehmendem Maß durch applikative Lösungen erfüllt, wobei jedoch ein Mehraufwand in Kauf genommen werden muß.
Die angestrebten Lösungen beinhalten eine Kombination von Maßnahmen, die jedoch fast immer mit internen Statusmeldungen und internen und externen Selbstkorrektureinrichtungen verbunden sind. Der Einsatz von Rechnern ermöglicht zusätzlich eine Präzisierung des Präventivwartungszeitraumes und der durchzuführenden Eingriffe.

Literatur

[1] Firmenschrift Ultramat 3. Siemens AG, München 1977.
[2] Firmenschrift LUMOLYT. VEB Junkalor Dessau 1976.
[3] Firmenschrift DY 1. Hartmann & Braun AG, Frankfurt/M. 1972.
[4] *Warncke, H.*: Rechnergestützte automatische Überwachung der Betriebsanalytik, 6. INTERKAMA. Düsseldorf: VDI-Verlag 1974.
[5] *Schunck, G.*: Nichtdisperse Infrarot-Gasanalysatoren für Industrieprozesse und Umweltschutz. Hanau: Leybold-Heräus GmbH & Co. 1976.
[6] Firmenschrift L 3510. Hartmann & Braun AG, Frankfurt/M. 1974.

msr 6638

Doz. Dr.-Ing. *D. Chmúrny*, Bratislava/ČSSR [1])

Optimale Steuerung der Produktion von Schwefelsäure mit Hilfe eines Rechners (Teil II)

IA 2.1.7; 5.6.3

5. Experimentelle Auswertung

Im Bild 6 ist der Verlauf der auf analytische Weise aus dem linearen Modell berechneten und an der Produktionsanlage gemessenen Konversion gezeigt. Alle Berechnungen wurden mit dem Rechner „MINSK 22" durchgeführt, ebenso die Auswertung der gesteuerten Optimalwerte für die nichtgesteuerten Größen C_1, w, T_{vz} im Verlauf eines Monats. Es wurde das Analogmodell des Oxydationsprozesses von SO_2 und des automatischen Rechners gebildet. Mit deren Hilfe wurden die Verläufe $T_{p\,opt}$, $T_{1\,opt}$, $T_{2\,opt}$, $T_{3\,opt}$, $T_{4\,opt}$ für 30 Werte von C_1, w, T_{vz} ermittelt, die während des Betriebs an der Produktionsanlage beobachtet wurden. Es wurde ΔX als Differenz zwischen der optimalen Steuerung des Prozesses und der gegenwärtigen Anlagensteuerung berechnet (Tafel 3).

Das entworfene mathematische Modell des Prozesses ermöglicht, den Prozeß für die praktische Anwendung genügend genau zu beschreiben. Auf Grund der experimentellen Arbeiten, die in drei chemischen Betrieben durchgeführt wurden, kann man bei dem gegenwärtigen Niveau der Produktionssteuerung voraussetzen, daß man mit der optimalen Steuerung die Konversion in den Produktionsstätten für Schwefelsäure um 0,5 bis 1% erhöhen kann.

Das Grundschema der optimalen Steuerung der in der Arbeit angeführten Produktion ist im Bild 7 dargestellt.

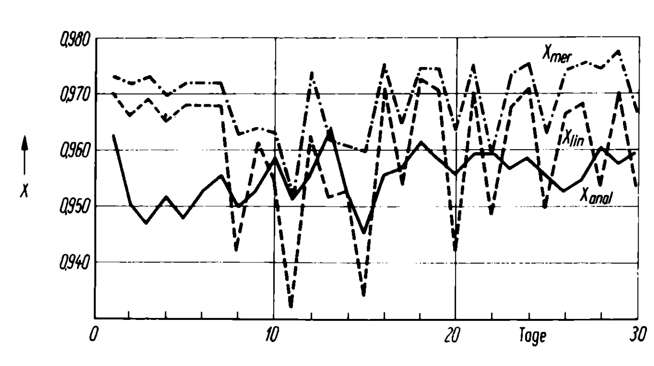


Bild 6. Verlauf der Konversion X_{mer}, X_{anal}, X_{lin}

X_{mer} gemessene Konversion an der Produktionsanlage; X_{anal} analytisch errechnete Konversion; X_{lin} nach dem linearen Modell errechnete Konversion

6. Vorschlag zur praktischen Realisierung der optimalen Steuerung der Schwefelsäureproduktion

Auf Grund der erreichten Ergebnisse schlagen wir für die praktische Realisierung folgendes vor:

1. Ausarbeitung des mathematischen Modells der Produktion nach obiger Methodik.
2. In der ersten Etappe (1/2 bis 1 Jahr) Handeinstellung der Optimalwerte der gesteuerten Größen (optimale Temperatur im Ofen für Schwefelverbrennung und optimale Temperaturen vor den einzelnen Schichten des Katalysators im Reak.

[1]) Teil I erschien im Heft 1/1979.

Tafel 3. Resultate der experimentellen Untersuchungen, die in einem chemischen Betrieb unter Anwendung der Optimalsteuerung erzielt wurden

lfd. Nr.	C_1	$\dot{w}$	T_{vz}	$T_{p\,opt}$	$T_{1\,opt}$	$T_{2\,opt}$	$T_{3\,opt}$	$T_{4\,opt}$	X_{opt}	$X_{opt} - X_{ne\,opt}$	$X(\%)$
1	0,999	0,471	321,0	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9848	0,0216	2,24
2	0,998	0,471	321,6	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9845	0,0333	3,50
3	0,999	0,477	321,7	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9851	0,0377	3,97
4	0,999	0,471	320,7	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9846	0,0327	3,44
5	0,998	0,471	321,7	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9845	0,0363	3,83
6	0,995	0,471	300,8	1027,5	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9724	0,0127	1,33
7	0,995	0,385	302,3	1027,5	470,6	441,4	457,1	448,3	0,9794	0,0192	2,00
8	0,995	0,468	298,3	1027,5	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9717	0,0145	1,52
9	0,998	0,468	304,4	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9764	0,0231	2,42
10	0,998	0,471	304,6	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9765	0,0170	1,78
11	0,997	0,471	304,8	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9755	0,0243	2,56
12	0,997	0,471	309,5	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9775	0,0220	2,30
13	0,996	0,471	314,7	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9792	0,0151	1,56
14	0,997	0,468	306,0	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9760	0,0234	2,46
15	0,995	0,471	300,8	1027,5	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9724	0,0127	1,33
16	0,995	0,385	302,3	1027,5	470,6	441,4	457,1	448,3	0,9794	0,0192	2,00
17	0,995	0,468	298,3	1027,5	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9717	0,0145	1,52
18	0,996	0,471	302,7	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9735	0,0118	1,22
19	0,996	0,471	306,4	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9765	0,0162	1,69
20	0,995	0,462	303,7	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9732	0,0173	1,82
21	0,995	0,471	300,8	1027,5	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9724	0,0127	1,33
22	0,995	0,385	302,3	1027,5	470,6	441,4	457,1	448,3	0,9794	0,0192	2,00
23	0,995	0,468	298,3	1027,5	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9717	0,0145	1,52
24	0,996	0,468	301,6	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9729	0,0144	1,50
25	0,996	0,471	301,8	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9731	0,0174	1,82
26	0,996	0,471	305,4	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9752	0,0220	2,31
27	0,996	0,471	306,7	991,7	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9752	0,0202	2,12
28	0,995	0,471	300,8	1027,5	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9724	0,0127	1,33
29	0,995	0,385	302,3	1027,5	470,6	441,4	457,1	448,3	0,9794	0,0192	2,00
30	0,995	0,468	298,3	1027,5	450,6	441,4	457,1	448,3	0,9717	0,0145	1,52

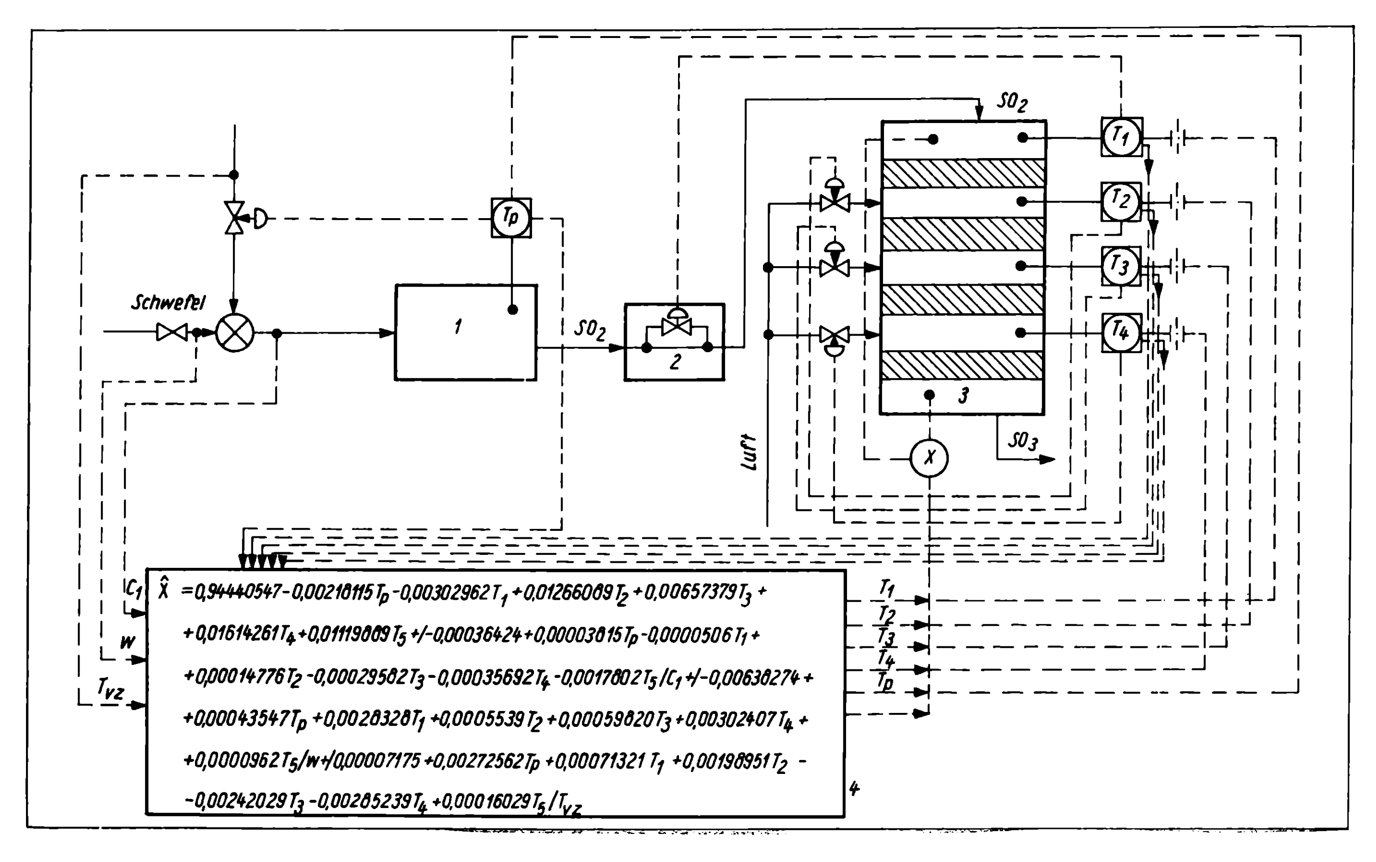
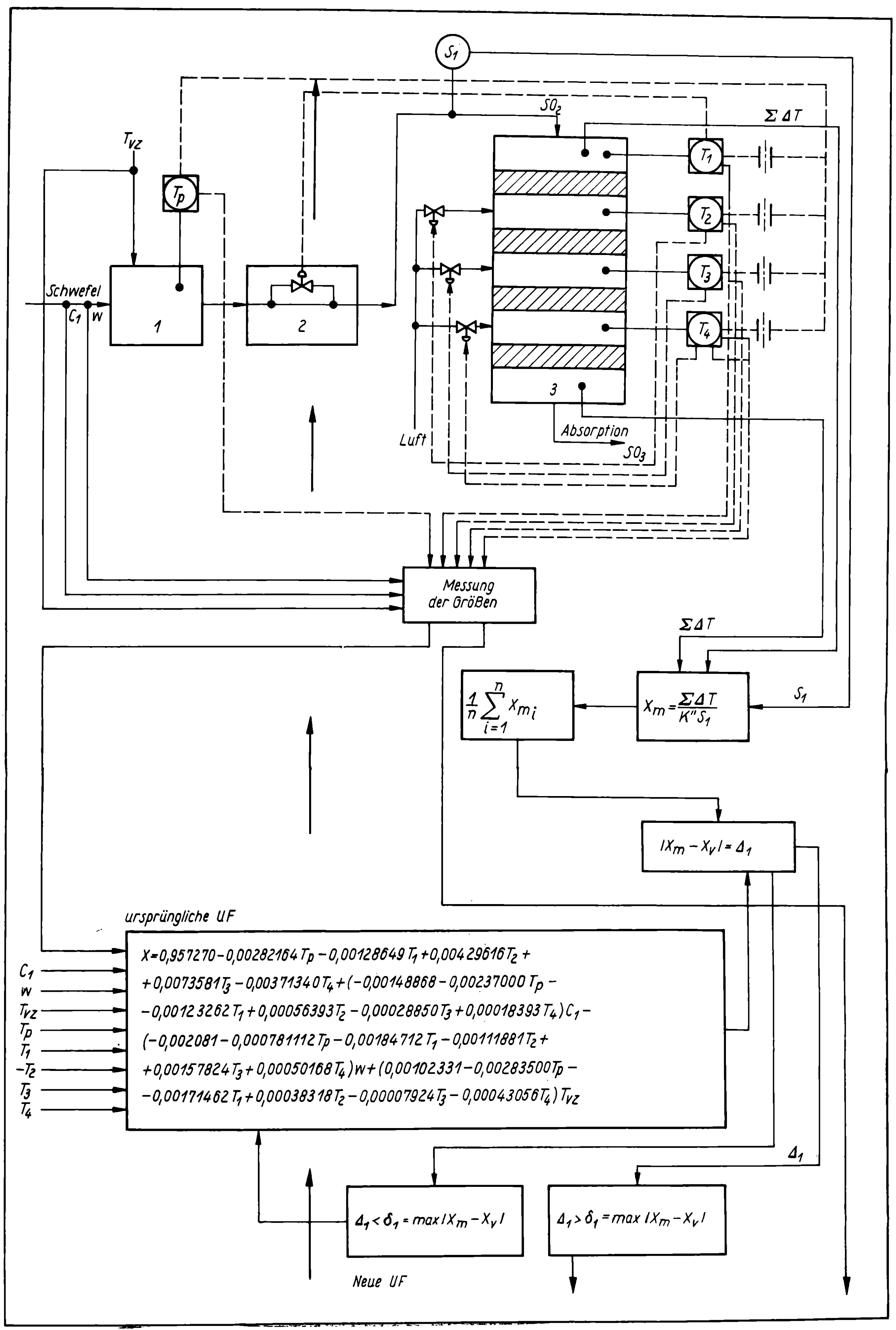


Bild 7. Grundschema des Optimalisators



S_1
SO_2
$\Sigma \Delta T$
T_{vz}
T_p
T_1
T_2
T_3
T_4
Schwefel
C_1
w
1
2
3
Luft
Absorption
SO_3
Messung der Größen
$\Sigma \Delta T$
$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_{m_i}$
$X_m = \frac{\Sigma \Delta T}{K'' S_1}$
S_1
$|X_m - X_v| = \Delta_1$
ursprüngliche UF
$X = 0,957270 - 0,00282164\,T_p - 0,00128649\,T_1 + 0,00429616\,T_2 +$
$+ 0,0073581\,T_3 - 0,00371340\,T_4 + (-0,00148868 - 0,00237000\,T_p -$
$- 0,00123262\,T_1 + 0,00056393\,T_2 - 0,00028850\,T_3 + 0,00018393\,T_4)\,C_1 -$
$(-0,002081 - 0,000781112\,T_p - 0,00184712\,T_1 - 0,00111881\,T_2 +$
$+ 0,00157824\,T_3 + 0,00050168\,T_4)\,w + (0,00102331 - 0,00283500\,T_p -$
$- 0,00171462\,T_1 + 0,00038318\,T_2 - 0,00007924\,T_3 - 0,00043056\,T_4)\,T_{vz}$
C_1
w
T_{vz}
T_p
T_1
$-T_2$
T_3
T_4
Δ_1
$\Delta_1 < \delta_1 = \max |X_m - X_v|$
$\Delta_1 > \delta_1 = \max |X_m - X_v|$
Neue UF

Bild 8 (s. S. 89)

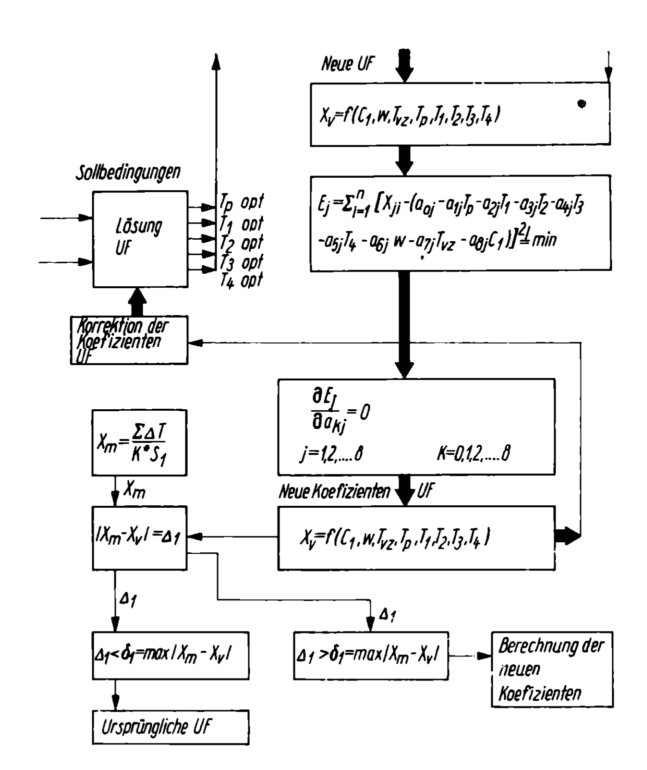


Bild 8. Optimale Steuerung der Produktion von Schwefelsäure mit Hilfe des Rechners

tor). Dabei ist es notwendig, in regelmäßigen Zeitintervallen (am besten kontinuierlich) die nichtgesteuerten Größen zu messen, d. h. den Schwefeldurchfluß und die Lufttemperatur. Dabei kann die Konzentration des Schwefels als konstant angenommen werden.

3. Nach halb- bis einjährigen Betrieb Übergang zur optimalen Steuerung mit Hilfe eines Einzwecksteuerrechners.
4. Für die erfolgreiche Inbetriebnahme der gesamten optimalen Steuerung ist es noch notwendig, die Durchflußmenge von Schwefel ständig zu messen.

Auf Grund obiger Analyse schlagen wir vor, die Schwefelsäureherstellung entsprechend dem Grundschema im Bild 7 zu steuern. Dort sind die Hauptmeß- und -regelkreise für den Verbrennungsofen eingetragen. Weiterhin ist ein Steuerrechner entworfen, der auf Grund der Schwefeldurchflußmenge, der Schwefelkonzentration und der Temperatur der Verbrennungsluft die Optimaltemperaturen im Ofen und Kontaktreaktor automatisch so auswertet, daß die Konversion den maximalen Wert erreicht.

Der ökonomische Effekt hängt stark von der gegenwärtigen Steuerung der Produktion ab. Die experimentellen Arbeiten bestätigen, daß bei einem neuen Katalysator die Konversion um 0,5%, bei einem alten um 1 bis 1,5% erhöht werden kann. Durchschnittlich kann man durch die optimale Steuerung die Konversion um 1% erhöhen. Diese Ersparnis kann ohne größere Investitionskosten dadurch erreicht werden, daß der Operator die Schwefelsäureproduktion mit Hilfe des mathematischen Modells steuert. Größere Ersparnisse kann man durch den Einsatz des Steuerrechners sowie auch durch die Schwefelsäureherstellung mit Zwischenabsorption erreichen.

7. Optimalssteuerung der Schwefelsäureproduktion mit Zwischenabsorption

Die Zielfunktion hat folgende Form:

$$\hat{X} = 0{,}94440547 - 0{,}00218115\ T_p - 0{,}00302962\ T_1 + 0{,}01266089\ T_2 + 0{,}00157379\ T_3 + 0{,}01614261\ T_4 + 0{,}01119889\ T_5 + (-0{,}00036424 + 0{,}00003815\ T_p - 0{,}00000506\ T_1 + 0{,}00014776\ T_2 - 0{,}00029582\ T_3 - 0{,}00035692\ T_4 - 0{,}0017802\ T_5)\ C_1 + (-0{,}00638274 + 0{,}00043547\ T_p + 0{,}00283287\ T_1 + 0{,}00055339\ T_2 + 0{,}00059820\ T_3 + 0{,}00302407\ T_4 + 0{,}0000962\ T_5)\ w + (0{,}00007175 + 0{,}00272562\ T_p + 0{,}00071321\ T_1 + 0{,}00198951\ T_2 - 0{,}00242029\ T_3 - 0{,}00285239\ T_4 - 0{,}00016029\ T_5)\ T_{vz}\,.$$

Man kann schlußfolgern, daß die vom Autor ausgearbeitete Methode der optimalen Steuerung der Schwefelsäureproduktion auch bei der Schwefelsäureproduktion mit Zwischenabsorption und bei ähnlichen chemisch-technologischen Produktionsprozessen angewendet werden kann.

8. Optimale Steuerung von chemisch-technologischen Systemen mit Korrektur der Modellparameter

Die Koeffizienten des Modells kann man mit Änderung der Eigenschaften des Katalysators usw. ebenfalls ändern. Bei der Berechnung der optimalen Werte müssen diese Änderungen schrittweise berücksichtigt werden.

Das mathematische Modell des Prozesses wird beschrieben durch

$$X = f(T_p, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, C_1, w, T_{vz})\,. \tag{18}$$

Im gewählten Zeitintervall werden n Werte von jeder Eingangs- und Ausgangsgröße gemessen. Die Mittelwerte

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} Z_{ji} = Z_{jm} \tag{19}$$

werden in Gl. (18) eingesetzt. Es ist wahrscheinlich, daß der Mittelwert X_{jm} sich von der berechneten Größe X_{jv} unterscheidet. Wenn der Unterschied

$$|X_{1m} - X_{1v}| = \Delta_1$$

kleiner ist als eine maximal zulässige Abweichung $\delta_1 = \max \times \times |X_{1m} - X_{1v}|$, dann benutzt man für die Berechnung der optimalen Werte das ursprüngliche Modell. Wenn $\Delta_1 > \delta_1$, dann werden neue Koeffizienten ermittelt.

Mit der mehrmaligen linearen Regression werden die Minimalwerte von

$$E_j = \sum_{i=1}^{n} X_{ji} - a_0 + a_1 T_p + a_2 T_1 + a_3 T_2 + a_4 T_3 + a_5 T_4 + a_6 T_5 + a_7 C_1 + a_8 w + a_9 T_{vz}]^2 \stackrel{!}{=} \min$$

gesucht. Aus den Bedingungen

$$\frac{\partial E_j}{\partial a_{kj}} = 0; \qquad k = 0, 1, 2, \ldots, 8\,, \qquad j = 1, 2, \ldots, 8$$

erhalten wir die neuen Koeffizienten des mathematischen Modells, die in die Zielfunktion eingesetzt werden. Für die neuen Koeffizienten muß gelten:

$$\Delta_1 > \delta_1\,.$$

Der Signalflußplan für die optimale Steuerung von chemisch-technologischen Systemen mit der Korrektur der Modellparameter ist im Bild 8 gezeigt.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag befaßt sich mit der Bestimmung der optimalen Temperaturen in einem Kontaktreaktor zur Oxydation von Schwefeldioxid, das durch Verbrennung von Schwefelwasser-

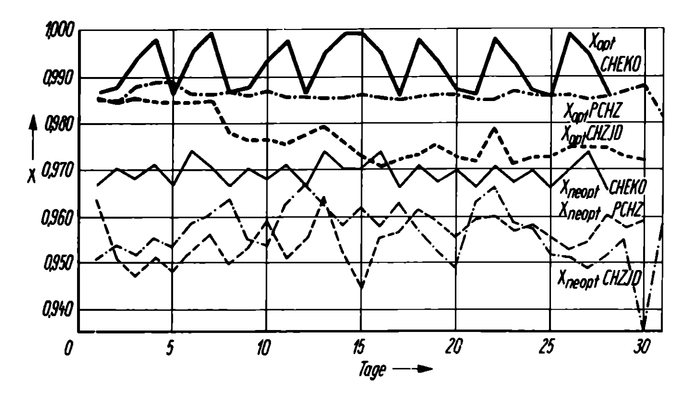


Bild 9. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der Optimalsteuerung der Schwefelsäureproduktion in drei Betrieben der Chemieindustrie

stoff oder Schwefel gewonnen wird. Unter Verwendung von Gleichgewichtsbedingungen werden allgemeine Beziehungen zwischen den Temperaturen und dem Konversionsgrad abgeleitet. Die numerischen Beziehungen gründen sich auf Betriebsmessungen und sind linearisiert. Die Koeffizienten der linearen Gleichungen werden mit der Regressionsanalyse bestimmt. Dadurch wird das Problem als ein lineares Modell mit linearen Begrenzungen betrachtet. Die Ermittlung des Optimums erfolgt mit der Box-Wilson-Methode. Zur Berechnung wird ein Einzweckrechner verwendet.

Die Berechnung der Optimalwerte der gesteuerten Größen bei verschiedenen Werten der nichtgesteuerten Größen ermöglicht, die Optimalbetriebswerte im voraus oder mit Hilfe des Rechners im Echtzeitbetrieb zu berechnen.

Nach experimentellen Untersuchungen kann der Konversionsgrad durch die optimale Steuerung des Prozesses durchschnittlich um 0,5 bis 1% erhöht werden. Im Bild 9 sind die Resultate angeführt, die in drei chemischen Betrieben erzielt wurden.

Literatur

[1] *Chmúrny, D.:* Optimierung eines Kontaktreaktors. Dissertation, TH Bratislava 1969.
[2] *Chmúrny, D.:* Methode zur Optimalsteuerung der Schwefelsäureherstellung. Habilitationsschrift, TH Bratislava 1971.
[3] *Chmúrny, D.:* Optimierung von Kontaktreaktoren. Chemický průmysl 22 (1972) H. 6, S. 269–274.
[4] *Chmúrny, D.:* Ein Extremwertregler für Kontaktreaktoren. ČSSR-Patent Nr. 146865.
[5] *Boreskov, A. K.:* Modellierung und Optimierung der katalytischen Prozesse. Moskau: Nauka 1965.
[6] *Chmúrny, D.:* Nachprüfung der Methode zur Optimalsteuerung der Schwefelsäureproduktion. Wiss. Arbeit, TH Bratislava 1973/74.
[7] *Kafarov, V. V.:* Methoden der Kybernetik in der Chemie und chemischen Technologie. Moskau: Nauka Chimija 1971.
[8] *Ostrovskij, G. M.; Wolin, J. M.:* Optimierungsmethoden der komplizierten chemischen Schemata. Moskau: Nauka Chimija 1969.
[9] *Ruzinow, L. P.:* Statistische Methoden der Optimierung von chemischen Prozessen. Moskau: Chimija 1972.
[10] *Chmúrny, D.:* Optimale Steuerung der Schwefelsäureherstellung mit Hilfe eines Prozeßrechners. Automatika (1973) No. 5/6.
[11] *Chmúrny, D.:* Optimale Steuerung der Schwefelsäureherstellung mit Hilfe eines Rechners. Chemik (1974) H. 3, S. 282–287.
[12] *Kafarov, V. V.; Perov, V. L.; Mešalkin, V. P.:* Principy matematičeskovo modelirovanija chimikotechnologičeskich sistem. Moskau: Chimija 1974.
[13] *Minsker, I. N.:* Operativnoje upravlenije chimikotechnologičeskimi komplexami. Moskau: Chimija 1972.
[14] *Crowe, C. M.:* Chemical plant simulation. New York: Prentice-Hall Englewood-Cliffs 1973.
[15] *Ostrovskij, G. M.; Volin, J. M.:* Ob odnom metode razčeta optimalnych sistem. Techničeskaja kibernetika (1968) No. 2, S. 28–32.
[16] *Sliňko, M. G.:* Chimičeskaja promyšlennost (1960) H. 3, S. 35–39; (1963) H. 6, S. 48–52.
[17] *Nalimov, V. V.; Černova, N. A.:* Statističeskije metody planirovanija extremal'nych experimentov. Moskau: Nauka 1965.
[18] *Davidson, V.; Thodos, G.:* Konetics of the Catalitic Oxidation of Sulfur Dioxide. Am. Inst. Eng. (1964) No. 10, p. 568.
[19] *Levenspiel, O.:* Chemical Reaction Engineering. New York: John Wiley & Sons 1962.

msr 6072

Dipl.-Ing. *H. Grützner*, Leipzig, und Dipl.-Phys. *A. Hoffmann*, Teltow[1])

Neue Vorschriften für die Errichtung eigensicherer Anlagen (Teil II)

IA 6.4; 6.5

4.3. *Zusammenschaltung von Betriebsmitteln in eigensicheren Stromkreisen*

Bei der Zusammenschaltung von Betriebsmitteln in einem eigensicheren Stromkreis sind neben der Einhaltung der maximal zulässigen Kapazität und Induktivität in eigensicheren Stromkreisen zwei Punkte zu beachten:

- Die Zündwilligkeitsgruppe und die Kategorie des gesamten eigensicheren Stromkreises wird durch die niedrigste im eigensicheren Stromkreis vorkommende Zündwilligkeitsgruppe bzw. Kategorie bestimmt. Das trifft nicht zu für Kreise, die voneinander galvanisch getrennt sind.
- In einem eigensicheren Stromkreis darf nur ein Betriebsmittel enthalten sein, für dessen eigensicheren Außenkreis maximale Induktivitäts- und Kapazitätswerte vorgeschrieben sind.

Es wurde schon beschrieben, daß die galvanische Verbindung eigensicherer Stromkreise miteinander ohne ausdrückliche Bestätigung der Prüfstelle nicht zugelassen werden kann, weil in einem eigensicheren System die Energieverhältnisse (Kapazitäts-Spannungs-Strom-Induktivität) nicht mehr eindeutig, ohne zusätzliche Messungen, übersehbar sind. Ein spezieller Fall der galvanischen Verbindung eigensicherer Stromkreise ist das Einschalten von zwei oder mehreren teilweise eigensicheren Betriebsmitteln, für deren Außenkreise L_A- und C_L-Werte angegeben werden. Ist eine derartige Zusammenschaltung nötig (z. B. Einschaltung eines Temperatur-Meßverstärkers und eines Rechners in den Kreis eines Thermoelementes), muß eine derartige Zusammenschaltung von der Prüfstelle bescheinigt werden.

Für diese Zusammenschaltung werden dann neue C_L- und L_A-Werte von der Prüfstelle festgelegt.

Die Zwischenschaltung eines Potentialtrenners in einen eigensicheren Stromkreis ist so anzusehen, daß der Potentialtrenner (natürlich mit Typ-Prüfbescheinigung) den eigensicheren Stromkreis in zwei Stromkreise aufteilt, die galvanisch voneinander getrennt sind, obwohl das Informationssignal von dem einen Stromkreis auf den anderen Stromkreis übertragen wird. Es können beide oder nur ein Stromkreis eigensicher sein. Natürlich ist auch hier zu beachten, daß sich in jedem eigensicheren Stromkreis nur ein Betriebsmittel befindet, für das C_L- und L_A-Werte angegeben sind.

4.4. *Betriebsmittel in eigensicheren Stromkreisen*

Die Möglichkeiten des Einsatzes der einzelnen Arten von Betriebsmitteln in eigensicheren Stromkreisen, unterschieden in

[1]) Teil I erschien im Heft 1/1979.

Tafel 2. Möglichkeiten des Einsatzes von Betriebsmitteln in eigensicheren Stromkreisen

Arbeitsstätte	Art des Betriebsmittels	
	mit Typ-Prüfbescheinigung	ohne Typ-Prüfbescheinigung
nicht explosionsgefährdet	– teilweise eigensichere Betriebsmittel (ex) i, die nicht zusätzlich in einer anderen Schutzart ausgeführt sind – störspannungssichere Betriebsmittel, die nicht zusätzlich in einer anderen Schutzart ausgeführt sind	
explosionsgefährdet	– eigensichere Betriebsmittel – teilweise eigensichere Betriebsmittel (Ex_p) i, die zusätzlich in einer anderen Schutzart ausgeführt sind – störspannungssichere Betriebsmittel, die zusätzlich in einer anderen Schutzart ausgeführt sind	– aktive Geber mit einer EMK < 1 V und einem Kurzschlußstrom <100 mA, die die Bedingungen für passive Betriebsmittel (Betriebsmittel normaler Bauart ohne Typ-Prüfbescheinigung) in eigensicheren Stromkreisen erfüllen, z. B. Thermoelemente – passive Betriebsmittel, die nur eigensichere Stromkreise enthalten und die Bedingungen für passive Betriebsmittel in eigensicheren Stromkreisen erfüllen, z. B. Manometer mit Grenzwertkontakten, Widerstandsthermometer

explosionsgefährdete und nicht explosionsgefährdete Arbeitsstätten, sind in Tafel 2 zusammengefaßt.

Betriebsmittel, die in explosionsgefährdeten Arbeitsstätten eingesetzt werden können, dürfen selbstverständlich auch in eigensicheren Stromkreisen in nicht explosionsgefährdeten Arbeitsstätten eingesetzt werden.

Die Bedingungen für passive Betriebsmittel in eigensicheren Stromkreisen sind:

- Schutzgrad IP 44, wenn das Betriebsmittel mehrere eigensichere Stromkreise enthält
- Schutzgrad IP 22, wenn das Betriebsmittel nur einen eigensicheren Stromkreis enthält
- Schutz der Klemmen gegen Selbstlockern, d. h., Verwendung von Federringen, Federklemmen, Zahnscheiben und bis M 3 Anwendung von Sicherungslack
- Prüfwechselspannung von 500 V/50 Hz
- Isolationswiderstand von mindestens 250 kΩ
- Einhaltung der für die jeweilige Kategorie der Eigensicherheit geforderten Bedingungen, d. h., daß in einen Kreis, der durch seine Kategorie und Sicherheitspegel für nicht funkengebende Teile ausgelegt ist, nicht zusätzlich funkengebende Teile wie Potentiometer oder Grenzwertkontakte eingeschaltet werden.

4.5. *Schutzgrad in eigensicheren Anlagen*

Der Schutzgrad von Betriebsmitteln in eigensicheren Stromkreisen ist wie folgt festgelegt:

- eigensichere Betriebsmittel — IP 44 (nach TGL 19491)
- teilweise eigensichere Betriebsmittel — IP 44 (nach TGL 19491)
- störspannungssichere Betriebsmittel — IP 44 (nach TGL 19491)
- passive Betriebsmittel, die nur eigensichere Stromkreise enthalten — IP 44, wenn das Betriebsmittel mehrere eigensichere Stromkreise enthält; IP 22, wenn das Betriebsmittel nur einen eigensicheren Stromkreis enthält.

Das bedeutet z. B. für den Schutzgrad von Widerstandsthermometern:

- IP 44 für Doppelwiderstandsthermometer, wenn diese durch zwei verschiedene eigensichere Stromkreise gespeist werden.
- IP 22 für Einfachwiderstandsthermometer und für Doppelwiderstandsthermometer, die nur als Einfachwiderstandsthermometer benutzt werden, um z. B. bei Ausfall eines Meßeinsatzes den zweiten Meßeinsatz benutzen zu können.

Der Schutzgrad aller dieser Betriebsmittel darf auch niedriger sein, wenn ein entsprechender Schutzgrad durch ein umgebendes Gefäß, z. B. Schrank, oder ein entsprechender Schutz gegen Staubablagerungen, unbeabsichtigte Berührung bzw. mechanische Beschädigung und ein entsprechender Schutz gegen Feuchtigkeit durch den umgebenden Raum gewährleistet ist (vgl. Abschn. 4.2). Die Angaben für den Schutzgrad sind Mindestforderungen, die durch die Eigensicherheit bedingt sind. Höhere Forderungen, die z. B. aus den Umgebungsbedingungen resultieren können, sind nicht berücksichtigt.

4.6. *Verbindungselemente*

Die Verbindungen zwischen verschiedenen eigensicheren Leitern kann nach wie vor durch Klemmen, Löten, Quetschen, Schweißen und Stecken hergestellt werden.

Klemmverbindungen müssen gegen Selbstlockern gesichert sein.

Wickel- und Quetschverbindungen sind nur zulässig, wenn sie mit dafür vorgesehenen Spezialwerkzeugen ausgeführt sind. Diese Forderung ist notwendig, um zu gewährleisten, daß eine ausreichende feste und sich nicht selbst lockernde Verbindung besteht, was nur mit Sicherheit gewährleistet ist, wenn die Prüfung der Qualität der Verbindung schon bei der Entwicklung und Herstellung des Werkzeuges gewährleistet ist. Steckverbindungen für eigensichere Stromkreise müssen so beschaffen sein, daß das Herstellen von Steckverbindungen mit nicht eigensicheren Stromkreisen nicht möglich ist. Die Folge dieser Forderung ist die Anwendung von getrennten Steckersystemen für eigensichere und für nicht eigensichere Verbindungen, bei denen die Stecker z. B. verschiedene Stiftabstände haben. Eine weitere Möglichkeit, diese Forderung einzuhalten, ist die Verwendung von Programmier-Führungsstiften an den Steckerleisten, die gewährleisten, daß weder Stecker mit eigensicheren Stromkreisen in eine Buchse mit nicht eigensicheren Stromkreisen, noch ein Stecker mit nicht eigensicheren Stromkreisen in eine Buchse mit eigensicheren Stromkreisen gesteckt werden kann.

Für alle Verbindungselemente gelten die Forderungen nach 500 V/50 Hz Prüfspannung und 250 kΩ Isolationswiderstand und ein Schutzgrad von mindestens IP 44 sowie die Einhaltung der Kriech- und Luftstrecken zwischen eigensicheren Stromkreisen. Die Verwendung von explosionsgeschützten Verbindungselementen (also mit Typ-Prüfbescheinigung des IfB), z. B. von

Klemmen der Schutzart (Ex)e ist nicht nötig, wenngleich möglich. Sie bieten sich an, da für diese Verbindungselemente die obigen Forderungen stets erfüllt sind und somit Maßnahmen bei der Montage entfallen.

4.7. Kabel und Leitungen

Für Kabel und Leitungen gibt es Bestimmungen, die beibehalten wurden und Bestimmungen, die neu sind oder präzisiert wurden.

Die nach wie vor geforderten Werte für Kabel und Leitungen in eigensicheren Stromkreisen sind die Gewährleistung von mindestens 250 kΩ Isolationswiderstand und der Prüfspannung von 500 V/50 Hz zwischen den einzelnen Leitern als auch zwischen den Leitern und den Abschirmungen und zwischen evtl. vorhandenen Abschirmungen und Abschirmungen und Erde. Diese Forderungen bereiten bekanntlich keine Probleme. Die Forderung der getrennten Verlegung eigensicherer Leitungen von nicht eigensicheren Leitungen aus Gründen der Störbeeinflussung bzw. das Abschirmen gegeneinander ist ebenfalls nicht neu. Innerhalb von Zentraleinrichtungen wird der Abstand von 8 mm als Mindestabstand zwischen eigensicheren und nicht eigensicheren Leitungen vorgeschrieben.

Neu ist, daß nicht belegte Leiter in Kabeln und Leitungen sowie Abschirmungen an einer gemeinsamen Stelle zu erden und das freie Ende zu isolieren ist. Das Anklemmen an freie Klemmen in Verteilerkästen ist dabei als Isolierung zu betrachten.

Mit der Forderung der Isolation des freien Endes soll verhindert werden, daß die Abschirmungen bzw. die unbenutzten Adern, die evtl. ein Potential gegen Erde haben, bei einem unbeabsichtigten Erdschluß der freien Enden eine Funkenbildung hervorrufen und zu einer Explosion führen können. Die wesentlichste neue Bestimmung der TGL 200-0621/05 bezüglich Kabel und Leitungen in eigensicheren Anlagen ist die Festlegung des Mindestquerschnitts auf 0,35 mm², was einem Durchmesser von 0,7 mm entspricht. Hier besteht ein wesentlicher Unterschied zu sonstigen explosionsgeschützten Anlagen, für deren Leiter ein Mindestquerschnitt von 0,5 mm², was einem Durchmesser von 0,8 mm entspricht, festgelegt ist. Die Gründe für die Herabsetzung des Mindestquerschnittes für Leiter eigensicherer Anlagen liegen in der Materialökonomie. Sicherheitstechnisch ist dieser Schritt vertretbar, da die Eigensicherheit im Fall eines Leitungsbruches noch eine solche Sicherheit bietet, daß eine unmittelbare Explosionsgefahr ausgeschlossen werden kann. Voraussetzung für eine Anwendung dieses geringen Querschnitts ist natürlich, daß die verwendeten Klemmen für diesen Querschnitt geeignet und vorgesehen sind.

4.8. Kennzeichnung eigensicherer Stromkreise

Die Kennzeichnung eigensicherer Stromkreise erfolgt weiterhin in der Farbe hellblau. Während bisher nur die Farbe angegeben wurde, ist die Kennzeichnung nun etwas präzisiert worden, ohne jedoch die Möglichkeiten der verschiedenen Betreiber einzuschränken.
Kabel und Leitungen sind an ihren Enden und in angemessenen Abständen, mindestens jedoch alle 10 m, mit einem 1 cm breiten Streifen zu kennzeichnen. Klemmstellen und Leiterverbindungen sind durch die Enden der jeweiligen Leiter und durch die Abdeckung hellblau zu kennzeichnen.

Verteilerkästen, Betriebsmittel und Steckverbinder sind mit 1 cm breiten hellblauen Farbstreifen zu kennzeichnen. Wenn Kabel und Leitungen auf Kabelbahnen bzw. -pritschen verlegt und diese gekennzeichnet sind, ist eine gesonderte Kennzeichnung der Kabel und Leitungen nicht nötig. Der Farbton der Kennzeichnung durch Anstrichstoffe ist lichtblau, da bei Anstrichstoffen der Farbton Hellblau nicht standardisiert ist. Die Dauerhaftigkeit bzw. Nachbesserung der Farbkennzeichnung ist durch den Betreiber zu gewährleisten.

5. Prüfung eigensicherer Anlagen

Die Vorstellungen zur Prüfung eigensicherer Anlagen wurde bereits in einem früheren Stadium veröffentlicht [6]. Sie wurden inzwischen präzisiert, in Vorschriften umgesetzt und sind so ein neuer Bestandteil der TGL 200-0621/05.

Bei der Prüfung eigensicherer Anlagen sind folgende Maßnahmen nötig:

1. Bestimmung des Isoliervermögens der Leiter und Abschirmungen untereinander und gegen Erde
2. Bestimmung der Induktivität des eigensicheren Stromkreises
3. Bestimmung der Kapazität des eigensicheren Stromkreises
4. Bestimmung der Fremdspannung

Erläuterungen zu diesen Maßnahmen:

1. Es ist in jedem Fall der Isolationswiderstand zu messen. Jedoch muß nicht der Isolationswiderstand aller Leiter der eigensicheren Anlage gegen alle Leiter und Abschirmungen gemessen werden. Es muß lediglich der Isolationswiderstand der Leiter und Abschirmungen gegeneinander gemessen werden, die in einer gemeinsamen Umhüllung (Kabel, Rohre, Kanäle) und/oder über eine gemeinsame Anschlußleiste (Klemmenkasten, Klemmenreihe) geführt werden. Da nur ein Isolationswiderstand von 250 kΩ verlangt wird, ist es möglich, den Isolationswiderstand eines Leiters jeweils gegen alle übrigen in Frage kommenden Leiter und Abschirmungen, die parallelgeschaltet sind, zu messen. Bei der Messung des Isolationswiderstandes der Leiter gegen Erde müssen die Abschirmungen geerdet sein und können als Erdpotential verwendet werden.
   Die Erdverbindung von geerdeten Leitern oder Schirmen ist bei der Messung eben dieser Leiter bzw. Schirme gegen Erde zu lösen. Betriebsmittel können bei der Messung des Isolationswiderstandes gegen Erde im Stromkreis belassen werden. Ist ihr Isolationswiderstand jedoch kleiner als 250 kΩ, können sie aus dem Stromkreis herausgenommen werden. An ihre Stelle muß eine elektrische Brücke gelegt werden oder die entstehenden freien Leiterenden sind miteinander zu verbinden.
2. Die Induktivität im eigensicheren Stromkreis kann durch Rechnen oder/und durch Messen bestimmt werden. Die Induktivität von Leitern kann im allgemeinen vernachlässigt werden.
3. Die Kapazität im eigensicheren Stromkreis kann durch Rechnen oder/und durch Messen bestimmt werden. Es kann also ein Teil gemessen und ein Teil errechnet werden.
   Für die Errechnung der Kapazität der Leitung kann, wenn der Außenkreis eine entsprechend hohe Kapazität zuläßt und die Leitungslänge bekannt ist, mit dem Wert von 500 pF/m als spezifische Leitungskapazität gerechnet werden.
4. Die Fremdspannung ist in jedem Fall zu messen. Als Fremdspannung wird jede sinusförmige Wechselspannung erfaßt. Spannungsspitzen wie z. B. Nadelimpulse als kurzzeitige Störungen werden bei der Prüfung eigensicherer Anlagen nicht als Fremdspannungen betrachtet, da die Einschätzung ihrer Gefährlichkeit und vor allem ihre meßtechnische Erfassung sehr problematisch ist.

Voraussetzung für die Messung der Fremdspannung ist, daß sich alle störenden Stromkreise, also die gesamte elektrotechnische Anlage im Betriebszustand befindet. Das gilt auch für den zu prüfenden Stromkreis. Funktionsbedingte Erdungen und die

Erdungen durch die Potentialverbindungsleitungen sind bei der Messung der Fremdspannungen zu lösen, da sonst die Fremdspannungen gegen Erde kurzgeschlossen wären.

Als Meßmittel ist ein Spannungsmeßgerät zu benutzen, dessen Eingangswiderstand mindestens 10 MΩ beträgt. Ist die Fremdspannung größer als

- 3 V bei Zündwilligkeitsgruppe IIC
- 4 V bei Zündwilligkeitsgruppe IIB
- 5 V bei Zündwilligkeitsgruppe IIA

ist eine weitere Untersuchung nötig oder die Anlage muß so verändert werden, daß die Fremdspannung unter dem entsprechenden Wert bleibt. Diese weitere Untersuchung ist die Bestimmung der Kapazität des Kreises gegen Erde. Auch hier kann sowohl die Rechnung als auch die Messung oder beides angewandt werden. Für Leitungen kann mit dem Wert von 500 pF/m als spezifische Kapazität gerechnet werden. Zur Erleichterung dient die Möglichkeit, nur die Kapazität der längsten Leitung gegen Erde zu messen und diesen Wert dann für weitere Stromkreise zugrunde zu legen. Es ist aber zu prüfen, ob Leitungsart und Legungsart sich in den zu vergleichenden Stromkreisen gleichen, d. h., ob ein derartiger Analogieschluß mit hoher Wahrscheinlichkeit richtig ist.

Ist die Kapazitätsermittlung des eigensicheren Stromkreises gegen Erde erfolgt, muß anhand der Tafel im Standard, die die Abhängigkeit der zulässigen Fremdspannung von der Kapazität des eigensicheren Stromkreises gegen Erde darstellt, ermittelt werden, ob die vorhandene Kapazität gegen Erde und die vorhandene Fremdspannung in dieser Zuordnung zulässig ist oder nicht. Sind diese Werte unter der angegebenen Grenze, ist die Prüfung des eigensicheren Stromkreises beendet. Ist dies nicht der Fall, müssen Maßnahmen getroffen werden, die die Fremdspannung oder/und die Kapazität des Kreises gegen Erde erniedrigen. Das ist z. B. möglich durch Abschirmung der Leitung, Verlegung der Leitung auf anderen Wegen, Verwendung anderen Leitermaterials.

Alle diese Maßnahmen zeigen, daß sie nach der Montage sehr aufwendig sind und somit jedem Projektingenieur und jedem Errichter nur angeraten werden kann, schon früher entsprechende und ausreichende Maßnahmen vorzusehen. Die Werte der Abhängigkeit der zulässigen Fremdspannung zur Kapazität zwischen eigensicherem Stromkreis und Erde haben sich gegenüber [6] etwas geändert. Die Änderungen ergaben sich aus der neuen Zuordnung von Spannung und Kapazität in der TGL 19491/06 vom Mai 1977.

Auf das Vorschreiben einer Prüftechnologie bei der Prüfung eigensicherer Anlagen wurde bewußt verzichtet. Die Prüftechnologie soll jedem Betrieb entsprechend seinen Möglichkeiten z. B. an Meßmitteln und anderen Hilfsmitteln vorbehalten bleiben.

Für die Revisionsprüfung, deren zeitlicher Abstand als Richtwert mit 2 Jahren vorgegeben wird, ist die Bestimmung der Kapazität und der Induktivität des eigensicheren Stromkreises nicht nötig. Der Nachweis der Prüfung ist in einem Protokoll zu führen. Die genaue Form des Protokolls ist in einer anderen TGL festgelegt. Dieser Standard, der voraussichtlich die Nummer 33054 und den Titel „Elektrotechnische Anlagen, Prüfprotokolle, Elektroenergieanlagen" tragen wird, befindet sich derzeitig noch im Entwurfsstadium.

Literatur

[1] *Pester, J.:* Neue Standards für Elektro- und BMSR-Anlagen in explosionsgefährdeten Arbeitsstätten – TGL 200-0621/01 bis TGL 200-0621/06. msr **21** (1978) H. 6, S. 340 und 341.

[2] TGL 30042 Gesundheits-, Arbeits- und Brandschutz; Verhütung von Bränden und Explosionen; allgemeine Festlegungen für Arbeitsstätten. Verbindlich ab 1. Januar 1980 (für Projektierung ab 1. Juli 1978).

[3] TGL 19491/06 Schlagwetter- und explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel; Eigensicherheit. Ausgabe Mai 1977. Verbindlich ab 1. Januar 1978.

[4] *Weigold, S.:* Neue Festlegungen für die Schutzart Eigensicherheit. msr **19** ap (1976) H. 1, S. 19.

[5] TGL 200-0602/03 Schutzmaßnahmen in elektrotechnischen Anlagen; Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannungen an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen. Ausgabe Dezember 1970.

[6] *Hoffmann, A.:* Neue Überlegungen zur Prüfung eigensicherer Anlagen. msr **18** ap (1975) H. 5, S. 121.

msr 6742

Prof. Dr. rer. nat. habil. *M. Peschel*, Berlin[1])

Modellbildung und Polyoptimierung

IA 1.1.9

Einleitung

Bei der Modellbildung konkreter Systeme muß man in der ersten Stufe eine für die Verhaltensbeschreibung geeignete und von den gewählten Zielen abhängige Systemklasse auswählen. Hierfür ist die Theorie unscharfer Systeme und Signale eine wichtige Grundlage.

In der zweiten Stufe ist unter Verwendung konkreter experimenteller Daten die durch die Klasse gegebene Vielfalt einzuschränken und ein geeigneter Repräsentant der Klasse auszuwählen. Bei dieser Auswahl kann man sich nur von Gütevorstellungen über das zu bestimmende System leiten lassen. Da Güte ein unscharfer Begriff ist, der im konkreten Fall durch mehrere Güteattribute untersetzt wird, kommt hierbei in natürlicher Weise die Polyoptimierung zur Anwendung.

Bei der Bestimmung der Systemklasse, der Formierung des entsprechenden Systemkonzepts, spielt eine Vielzahl dialektischer Gegensatzpaare eine Rolle wie:

- Teil und Ganzes, wesentliche und unwesentliche Faktoren;
- abstrakt und konkret, Funktion und Struktur;
- lokale und globale Eigenschaften, Statik und Dynamik;
- kontinuierlich und diskontinuierlich, Notwendigkeit und Zufall;
- Analyse und Synthese, Modellbildung und Steuerung.

Entsprechend den vorliegenden globalen Zielsetzungen läßt man sich von Kompromissen bei all diesen Gegensatzpaaren, von vorliegenden Erfahrungen, dem Stand der Theorie über den konkreten Gegenstand und wissenschaftlichen Hypothesen bei der Auswahl des Systemkonzepts leiten, das die Konturen der Klasse festlegt, in der das geeignetste Modell gefunden werden soll.

Bei der Modellbildung geht es immer um die Präzisierung einer Relation $R(y, x)$ zwischen Eingangsgrößen y und Ausgangs-

[1]) Mitteilung aus dem Forschungsbereich Mathematik/Kybernetik der AdW der DDR.

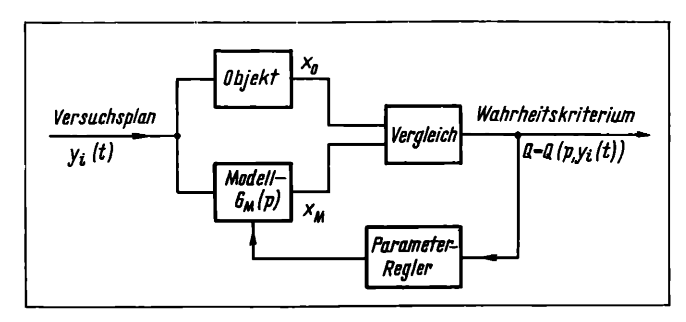


Bild 1. Strukturschema für den Objekt-Modell-Vergleich

größen x eines Systems. Eventuell zu berücksichtigende Zustandsgrößen haben Hilfscharakter. Systemkonzept bedeutet in der Regel die Angabe einer parametrisierten Klasse von Relationen $R(y, x, p)$ oder in aufgelöster Form einer parametrisierten Klasse von Übertragungsoperatoren $G_M(p)$ mit

$$x(t) = G_M(p)\, y(t)\,.$$

Die Präzisierung des Parametervektors p mit Hilfe konkreter Experimente erfolgt im sog. Objekt-Modell-Vergleich (Bild 1).

Zum Objekt-Modell-Vergleich gehört ein Kriterium für die Güte der Übereinstimmung zwischen Objekt und Modell. Dabei wird die Güte der Anpassung, wenn es sich um die Verhaltensnachbildung handelt, durch Vergleiche der Ausgangssignale von Objekt und Modell beurteilt. Bei der sog. zielorientierten Modellbildung kann der Vergleich an ganz anderer Stelle stattfinden, nämlich dort, wo die Güte der Erfüllung der vorgegebenen Ziele durch das gewählte Modell zu beurteilen ist.
Bei gewähltem Systemkonzept läuft die Modellbildung auf die Identifikation eines „besten" Parametervektors p hinaus.

Dies erfolgt in folgendem Zyklus:

1. Experiment
2. Gütebewertung: Güte zufriedenstellend Stop, sonst gehe nach 3.
3. Wahl des Parametervektors p für das Modell
4. Rückkehr zu 1.

Bei der Modellparameteranpassung treten eine Reihe von Problemen auf, die insgesamt beachtet werden müssen.

1. Inkorrektheit

Bei der Parameteridentifikation handelt es sich um eine sog. inverse Aufgabe. Aus den Werten des Anpassungskriteriums Q wird auf die notwendigen Veränderungen im Parameterraum des Modells geschlossen. Dies ist ein inkorrektes Problem im Sinne von *Tichonov*, d. h., die Lösung p kann auch bei wahrer Modellstruktur vieldeutig sein, und kleine Veränderungen in den Daten können zu großen Veränderungen des „optimalen" p-Wertes führen. Eine Regularisierung läuft auf die Einführung weiterer in der Regel logischer Kriterien neben dem eigentlichen Anpassungskriterium Q hinaus. Damit verläuft dann die Parameteranpassung unter den Bedingungen der Polyoptimierung.

2. Repräsentativität

Nach der Identifikation eines optimalen Parametervektors p^* soll der zugehörige Operator $G_M(p^*)$ der Verhaltensoperator des Systems sein, d. h. die gesamte Relation $R(y, x)$ des Objekts möglichst gut repräsentieren. Die Anpassung geschieht aber stets unter den Bedingungen der Durchführung spezieller Experimente (Lernfolge). Damit ist nicht mehr garantiert, daß der bestimmte Verhaltensoperator bei Anwendung eines beliebigen zulässigen Versuchsplans $y(t)$ gut ist, der in der Lernfolge noch nicht zur Anwendung gelangte.
Wir müssen damit rechnen, daß jeder Versuchsplan $y_i(t)$ einer Folge möglichst repräsentativer Versuchspläne zu einem von ihm abhängigen optimalen Parametervektor $\boldsymbol{p}^* = \mathrm{f}(y_i(t))$ führt. Damit ist auch das Anpassungskriterium durch die verschiedenen Versuchspläne $y_i(t)$ zu relativieren. Es entsteht folgende Polyoptimierungsaufgabe:
Gesucht ist ein Parametervektor $\boldsymbol{p}^*$, der im Sinne der Vektorhalbordnung folgender Anpassungskriterien effizient ist

$$Q_i = Q(\boldsymbol{p}; y_i(t))\,.$$

Die auftretenden Widersprüche zwischen diesen einzelnen Kriterien geben zugleich einen Einblick, wie gut das gewählte Systemkonzept ist. Bei einer wahren Modellstruktur müßten diese Widersprüche verschwinden, weil es dann in der Klasse einen Operator gibt, der das reale System wirklich beschreibt.

3. Unschärfe

Stochastische Einflußfaktoren auf das reale Objekt bewirken, daß die festgestellten Gütewerte zufällig sind, damit wird auch der Parametersuchprozeß ein zufälliger Prozeß, und eine scharfe Positionierforderung für $\boldsymbol{p}$ hat von vornherein keinen Sinn, sondern vielmehr eine Beschreibung der Lage von $\boldsymbol{p}$ durch Mittelwert und Streuung. Dies bedeutet aber die determinierte Fixierung eines unscharfen Stopgebietes im Parameterraum.
Ein zweiter Unschärfeeffekt kommt dadurch, daß man hinsichtlich des Anpassungskriteriums immer mit einer gewissen Abbruchtoleranz $Q_i \leqq \varepsilon_i$ (parallelepipedales Stopgebiet) bei zusätzlicher Forderung der Effizienz zufrieden ist. Im Parameterraum ist man dann zufrieden, wenn der Suchprozeß in das Urbild dieses Gebietes (statische Abbildung $\boldsymbol{Q} = Q(\boldsymbol{p})$ im Parameterraum geführt hat.

4. Ersatz des gegebenen Systemkonzepts durch Kombination der Polyoptimierung mit der unscharfen Systembeschreibung

Die prinzipielle Vorgehensweise wurde bereits in [1] beschrieben, wir können uns daher hier auf einen inhaltlichen Überblick beschränken. Wir veranschaulichen die Grundidee am Beispiel von zwei Gütekriterien Q_1 und Q_2, die sich z. B. auf zwei Versuchspläne $y_1(t)$ und $y_2(t)$ beziehen mögen.
Unter determinierten Bedingungen stellt sich die widersprüchliche Situation etwa wie im Bild 2 dar. Bei ungünstigen Modelleinstellungen gelangen wir im Raum der Gütekriterien in einen Punkt P oberhalb der Kurve der effizienten Lösungen. Die günstigsten Einstellungen führen zu Punkten auf der effizienten Kurve. Diese können untereinander nur noch bewertet und verglichen werden, wenn wir über sachlogische Zusatzinformationen verfügen, ansonsten sind diese Lösungen alle gleichberechtigt.
Unter den Bedingungen der Unschärfe können wir nicht mehr von einer scharf ausgeprägten effizienten Kurve sprechen. Die effiziente Kurve ist dann durch eine Unschärfeverteilung zu er-

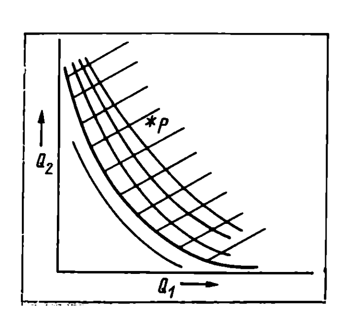


Bild 2. Effizienz im Sinne der Vektorhalbordnung

setzen, deren „Bergrücken" in etwa über der „determinierten" effizienten Kurve liegt, der aber eine gewisse Breite hat, die zur Streuung im statistischen Fall korrespondiert. Die Unschärfeverteilung $\varphi(\boldsymbol{Q})$ läßt sich durch ein System von Höhenlinien charakterisieren, wie dies im Bild 2 angedeutet ist. Entsprechendes gilt dann auch für das Urbild der effizienten Kurve im Parameterraum. Dieses ist jetzt durch eine Unschärfeverteilung $\varphi(\boldsymbol{p})$ zu ersetzen.

Ziel des Parameteranpassungsprozesses unter Anwendung der Unschärfekonzeption und der Polyoptimierung ist nunmehr die Identifikation dieser Unschärfeverteilung bei nachfolgender Anwendung einer Entscheidungsregel auf die erhaltene Unschärfeverteilung $\varphi(\boldsymbol{p})$.

Dieser Identifikationsprozeß zerfällt bei Anwendung der Idee von *Timmel* [2] in folgende Stufen:

1. Auswahl gleichverteilter Punkte $\boldsymbol{p}^1, \boldsymbol{p}^2, \dots, \boldsymbol{p}^N$ im Parameterraum des Modells.
   Unter Beachtung möglicher Ungenauigkeiten der Verwirklichung dieser Parameter am Modell konstruieren wir sog. elementare Unschärfeverteilungen $\varphi_\Delta(\boldsymbol{p}; \boldsymbol{p}^i)$ als unscharfe Beschreibung der einelementigen Mengen $\boldsymbol{p}^i$. Wir berechnen oder messen nach Anwendung entsprechender Versuchsplanfolgen die zugehörigen Punkte $\boldsymbol{Q}^i$ im Raum der Anpassungskriterien (Repräsentativität!) und beschreiben diese entsprechend durch elementare Unschärfeverteilungen $\varphi_\nabla(\boldsymbol{Q}; \boldsymbol{Q}^i)$, die in ihrer Gestalt die Information über Berechnungs- bzw. Meßungenauigkeiten zum Ausdruck bringen. Nach der monotonen Enveloppeneigenschaft der Polyoptimierung [3] zeigen bei gleichverteilten Punkten $\boldsymbol{p}^i$ die entsprechenden Punkte $\boldsymbol{Q}^i$ eine Häufigkeitserhöhung in der Nähe der effizienten Menge.
2. Aus allen bisher gewonnenen elementaren Unschärfeverteilungen bauen wir durch Anwendung einer Kombinationsregel im Sinn einer nichtparametrischen Schätzung eine erste Schätzung $\varphi^*(\boldsymbol{p})$ bzw. $\varphi^*(\boldsymbol{Q})$ für die effizienten unscharfen Mengen auf. Dabei bewerten wir durch entsprechende Gewichtung diejenigen elementaren Unschärfeverteilungen höher, die relativ effizient im Sinne der Vektorhalbordnung sind und beschleunigen damit den Effekt der Annäherung an die unscharfe effiziente Menge.
3. Die bisher erhaltene Schätzung $\varphi^*(\boldsymbol{p})$ benutzen wir nun zur Steuerung der weiteren Suche im Parameterraum. Wir entwerfen einen nächsten Suchpunkt durch Anwendung der üblichen Entscheidungsregel
   $$\boldsymbol{p} \leftarrow \max \varphi^*(\boldsymbol{p}) .$$
   In der Umgebung (gewisser Radius) von $\boldsymbol{p}$ ordnen wir endlich viele gleichverteilte weitere Suchpunkte $\boldsymbol{p}^i$ an und kehren nach Anweisung 1 zurück, wobei wir gegebenenfalls eine Abwertung der früheren Schätzung über einen Diskontfaktor $0 < s < 1$, vornehmen müssen, mit dem wir die bisher erhaltene Schätzung $\varphi^*(\boldsymbol{p})$ abwichten.
4. Den gesamten Prozeß brechen wir ab, wenn eine gewisse Stabilisierung der Schätzungen $\varphi^*(\boldsymbol{p})$ und $\varphi^*(\boldsymbol{Q})$ zu beobachten ist, wenn also die weitere Information redundant ist und eine weitere Beachtung der Halbordnung auch keinen Fortschritt mehr bringt.

5. Erweiterung des Systemkonzepts durch Aggregation von Grobmodellen als Weg zur Erhöhung der Repräsentativität

Mit im allgemeinen unterschiedlichen Systemkonzepten werden zum gegebenen realen System 0 endlich viele Grobmodelle $G^r_{\mathrm{M}}(\boldsymbol{p}^*_r)$ mit den Parametervektoren $\boldsymbol{p}^*_r \in P_r$ gewonnen. Dabei sind die P_r die Parameterräume für die Grobmodelle.

Ein Spezialfall dafür liegt vor, wenn zur Sicherung des Ersatzes die Systemkonzepte gleich sind und die Anpassung sich auf verschiedene Versuchspläne bezieht

$$G^r_{\mathrm{M}}(\boldsymbol{p}_r) = G_{\mathrm{M}}\big(\boldsymbol{p}; y_r(t)\big) .$$

Die Widersprüche zwischen den Grobmodellen seien nicht akzeptabel, so daß der Übergang zu einem erweiterten Systemkonzept als notwendig erscheint. Mit logischen Informationen werde als Basismodell ein erweitertes Systemkonzept $G_{\mathrm{M}}(\boldsymbol{p}_0)$ aufgestellt.

Es geht dann darum, die in den Grobmodellen gespeicherte Information über das reale Systemverhalten in das erweiterte Systemkonzept umzuspeichern. Dazu benötigen wir ein geeignetes Aggregationsverfahren. Solche Verfahren können auch wieder unter Verwendung unscharfer Beschreibungshilfsmittel und Anwendung der Polyoptimierung gewonnen werden.

Nachfolgend wird eine allgemeine Vorgehensweise zur Aggregation der Grobmodelle vorgeschlagen, die sich bereits bei unterschiedlichen Anwendungsfällen bewährt hat.

Das allgemeine Aggregationsverfahren besteht aus folgenden Schritten:

1. Bildung von angepaßten Grobmodellen $G^r_{\mathrm{M}}(\boldsymbol{p}^*_r)$ der Parameterräume P_r über den Aufbau der Unschärfeverteilungen $\varphi^*(\boldsymbol{p}_r)$. Dies geschieht nach dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Verfahren.
2. Alle Experimente werden nunmehr off-line wiederholt, indem man am Basismodell bei festeingestelltem Parametervektor $\boldsymbol{p}_0$ („Scheinwelt") alle Grobmodelle adaptiert. Daraus erhält man bedingte Unschärfeverteilungen $\varphi^*(\boldsymbol{p}_r/\boldsymbol{p}_0)$ für die Grobmodelle.
3. Wertbelegung der Komponenten eines geeignet definierten Sympathievektors $\boldsymbol{q} = (q_1, q_2, \dots, q_N)$. Dabei bewerte q_l (ein- oder mehrdimensional) die Nichtübereinstimmung von $\varphi^*(\boldsymbol{p}_r)$ mit der bedingten Verteilung $\varphi^*(\boldsymbol{p}_r/\boldsymbol{p}_0)$.

Den Abgleich zwischen diesen Verteilungen fassen wir nunmehr als eine Polyoptimierungsaufgabe auf. Steuerraum ist dabei der Parameterraum P_0 des Basismodells, und Gütekriterien sind die Komponenten q_l des Sympathievektors.

4. Organisation einer Parametersuche zur Lösung der Polyoptimierungsaufgaben über dem Raum P_0, d. h., es wird die Bestimmung effizienter Lösungen durch eine Unschärfeverteilung $\varphi^*(\boldsymbol{p}_0)$ beschrieben, in der sich die aus den Grobmodellen übernommene Information in das Basismodell dann ausdrückt.

Diese Aggregationsmethode für Grobmodelle zu einem Basismodell wurde für folgende Aufgabenstellungen mit Erfolg angewandt:

a) Lineare Regression mit dualer Basismethode
   Grobmodelle waren lineare Modelle $x = \Sigma a_i y_i$.
   Zu den Faktoren y_i wurden biorthogonale Faktoren y^d_j mit $(y_i, y^d_j) = K_i \delta_{ij}$ [4] bestimmt und damit die Parameter der Grobmodelle zu $a_i = (\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}^d_i)/K_i$ geschätzt.
   Basismodell war ein Ansatz nichtlinearer Regression
   $$x = \Sigma p^0_i y_i + \Sigma p^0_{ij} y_i y_j$$
b) Stetige lineare Regression
   Grobmodelle waren wieder $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{y}^T \boldsymbol{a}^*$.
   Kontinuierliche Parameterschätzung nach folgender Verstellgleichung
   $$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{a}^*(t)}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{b}\big(x(t) - x^*(t)\big)$$
   mit einem polyoptimalen Entwurf der Versuchsplanmatrix und der Schrittgrößenvektoren $\boldsymbol{b}$.
   Basismodell ist wieder ein Modell der nichtlinearen Regression
   $$x = \Sigma p^0_i y_i + \Sigma p^0_{ij} y_i y_j .$$
c) Identifikation nichtlinearer dynamischer Systeme [5]
   Basismodell ist hier die Kettenschaltung aus einem linearen dynamischen System mit konstanten Parametern und einem statisch nichtlinearen Polynomsystem (Bild 3).

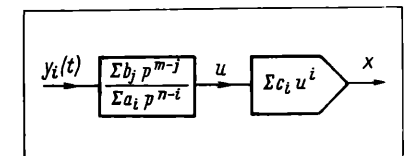


Bild 3. Struktur eines nichtlinearen dynamischen Systems

Als Grobmodell dienen lineare Systeme mit Laguerre-Ketten-Struktur, die sich voneinander durch die Versuchspläne $y_i(t)$ (harmonische Schwingungen) und die Zeitkonstanten unterscheiden. Ihre Struktur ist im Bild 4 dargestellt.

6. Modellbezogene Identifikation bei Zeitreihenmodellen

Zeitreihenmodelle haben den Charakter von Signalgeneratormodellen, wenn sich die mit ihnen durchzuführende Prognose nicht auf vorliegende Prognosen irgendwelcher Einflußgrößen stützen, soll, sondern als autonomer Prozeß (Wachstumsprozeß, Entwicklungsprozeß usw.) durchzuführen ist.

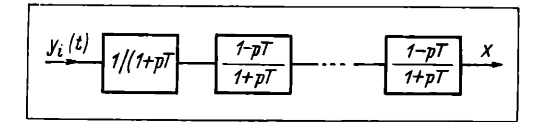


Bild 4. Struktur eines Laguerre-Ketten-Filters

Dabei kann man sich auf eine vorliegende A-priori-Information über die Zeitreihe stützen, die generell von der im Bild 5 dargestellten Art ist.

Es liegen zu den verschiedenen Zeitpunkten t_i Intervallinformationen über die zugehörigen Werte $x(t_i)$ der Zeitreihe vor, wobei die verschiedenen Punkte der Unschärfeintervalle ungleiche Chancen haben. Ist über die Chancenungleichheit irgendetwas bekannt, so ist es gut, diese Information in sog. elementaren Unschärfeverteilungen abzuspeichern. Diese sind impulsförmig, wobei die Impulse folgende qualitativ unterschiedlichen Informationen tragen können (Bild 6).

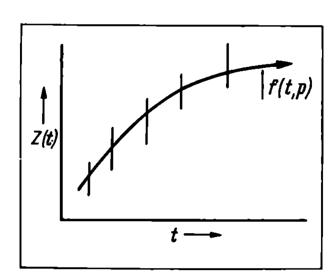


Bild 5. Unscharfer Charakter einer Zeitreiheninformation

1. Lageinformation (entspricht dem Meßwert a der klassischen Statistik, der dort durch eine δ-Funktion $\delta(z - a)$ repräsentiert wird),
2. Stärke (Maximalamplitude des Impulses als Maß der Vertrauenswürdigkeit der Gesamtinformation zum Zeitpunkt t_i),
3. Unschärferadius (Analogon zur Streuung in der Statistik),
4. Impulsfläche — Energie des Impulses; damit wird $r = F/A$ (Definition).

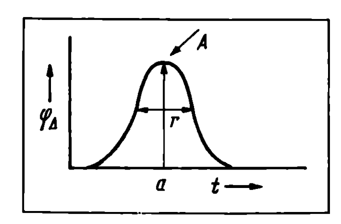


Bild 6. Zusatzinformation in einer parametrisierten elementaren Unschärfeverteilung

Vielfach verwendet man für die elementaren Unschärfeverteilungen ein parametrisches Konzept der folgenden Form

$$\varphi_\Delta(z) = A\psi(\sin\alpha) \quad \text{mit} \quad \sin\alpha = \frac{z-a}{b} \text{ (} b \text{ Hilfsparameter),}$$

wobei die Skalierungsfunktion $\psi(u)$ den folgenden Bedingungen genügt:

$$\psi(0) = 1 \qquad \psi(u) \leqq 1 \qquad \psi(u) = \psi(-u) \quad \psi'(u) \leqq 0 .$$

Die Erfahrungen zeigen, daß Vorhersagen mit Zeitreihen sehr unzuverlässig sind, wenn sie sich nur auf statistische Information stützen. Deshalb ist es günstig, als Aufhänger ein logisch wohlbegründetes deterministisches Modell zu nehmen und die statistischen Größen auf die Werte dieses parametrisierten Modells zu beziehen.

Für die Werte der Zeitreihe wird also der folgende Ansatz verwendet

$$z = \mathrm{f}(t, \boldsymbol{p}) + \xi .$$

Dabei ist ξ gegen Null verschoben. Wir erhalten durch diese Substitution neue miteinander vergleichbare Unschärfeverteilungen in der Nähe von Null durch

$$\tilde{\varphi}_\Delta(\xi) = \varphi_\Delta\big(\mathrm{f}(t, \boldsymbol{p}) + \xi\big) .$$

Diese vertreten einelementige unscharfe Mengen, nämlich die unscharfen Meßwerte der Zeitreihe relativiert durch das parameterisierte Modell. Diese elementaren Unschärfeverteilungen werden mit der Aggregationsregel, die der unscharfen Disjunktion entspricht, zu einer Unschärfeverteilung „zufälliger Meßfehler“ zusammengefaßt, z. B. durch

$$\varphi^*(\xi, \boldsymbol{p}) = \Sigma\varphi_\Delta\big(\xi + \mathrm{f}(t_i, p)\big)$$

oder

$$\varphi^*(\xi, \boldsymbol{p}) = \max \varphi_\Delta\big(\xi + \mathrm{f}(t_i, p)\big) .$$

Dieser aggregierte Impuls wird wieder wie ein Elementarimpuls hinsichtlich der Festlegung von Kennwerten behandelt:

$$\max \varphi^*(\xi, \boldsymbol{p}) \rightarrow a^* = a^*(p)$$

$$\varphi^*(a^*) = A^*(\boldsymbol{p})$$

$$F^* = \int\varphi^*(\xi, \boldsymbol{p})\, \mathrm{d}\xi \qquad r^* = F^*/A^* = r^*(p) .$$

Wir bilden zwei Gütekriterien

$Q_1 = |a^*(\boldsymbol{p})|$ entspricht dem bias oder systematischen Modellfehler

$Q_2 = r^*(p)$ entspricht der Modellvarianz bei der Regression

Durch Parametersuche für den Parameter $\boldsymbol{p}$ des Bezugsmodells lösen wir die Polyoptimierungsaufgabe, Q_1 und Q_2 möglichst klein werden zu lassen. Dadurch legen wir das effiziente Vergleichsmodell für die Zeitreihe fest, mit dessen Hilfe wir zukünftige Stützwerte vorhersagen.

Literatur

[1] *Peschel, M.*: Schätzprozedur für Zugehörigkeitsfunktionen aus experimentellen Daten und ihre Anwendung auf die Modellbildung. msr 19 (1976) H. 2, S. 46 und 47.

[2] *Timmel, G.*: Statistische Suchverfahren zur Bestimmung der Kompromißmenge. In: Polyoptimierung „Beiträge zur Optimierung bei mehrfacher Zielsetzung“. Wissenschaftliche Schriftenreihe der TH Karl-Marx-Stadt (1975) S. 65 – 75.

[3] *Peschel, M.*; *Riedel, C.*: Polyoptimierung — eine Entscheidungshilfe für ingenieurtechnische Kompromißlösungen. Berlin: VEB Verlag Technik 1976.

[4] *Peschel, M.*: Nutzung der dualen Basis zur Kennwertermittlung in parameterlinearen Modellen. msr 18 (1975) H. 4, S. 120 – 123.

[5] *Schwaar, M.*: Identifikation von nichtlinearen Regelungssystemen mit der Methode der Modellaggregation. Dissertation TH Karl-Marx-Stadt 1977.

[6] *Peschel, M.*: Modellbildung für Signale und Systeme. Berlin: VEB Verlag Technik 1978.

msr 6608

Prof. Dr. habil. *G. Schwarze*, Berlin[1])

Kombinierte Simulationssysteme

IA 1.1.6; 4.0.5.2

Einleitung

Die Einführung von Simulationssystemen für digitale Rechenanlagen brachte für umfassende Klassen von Anwendungsproblemen einen deutlich erleichterten Zugang zur Realisierung der Simulation, wenn das einer Simulation zugrunde liegende Modell sich günstig in einem bestimmten Simulationssystem beschreiben läßt. Da von der Seite des Software-Aspektes her bereits seit vielen Jahren Nutzungsmöglichkeiten für digitale Simulationssysteme, denen entweder kontinuierliche oder ereignisorientiert-diskrete mathematische Modelle zugrunde liegen, vorliegen, wurde oft in der Praxis der Weg gegangen, die mathematischen Modelle der zu simulierenden Systeme unter Berücksichtigung einer bestimmten Modellklasse zu entwickeln. Der Anwender ist es daher gewohnt, sich entweder für ein „kontinuierliches Modell" oder für ein „diskretes Modell" zu entscheiden und bevorzugt im Regelfall eine solche Modellbeschreibung, die leicht im Zusammenhang mit einem ihm bekannten Simulationssystem zu einem Rechenmodell führt. Bereits seit mehreren Jahren stehen immer mehr die sog. „kombinierten Simulationssysteme" im Blickpunkt der Entwicklung und damit naturgemäß im Zusammenhang Untersuchungen zur Notwendigkeit und Möglichkeit ihrer Anwendung. Damit steht aber auch verstärkt die Forderung, bei der Modellbildung „kombinierte Modelle" zu berücksichtigen, d. h. solche, die sowohl Aspekte der kontinuierlichen Modelle als auch der diskret-ereignisorientierten Modelle enthalten. Für den Anwender bedeutet dies, sich mit dieser Modellklasse näher zu beschäftigen, was teilweise auch bedeuten kann, von lieb gewordenen Vorstellungen und Methoden zur Modellermittlung sich zu trennen. Sowohl die diskret-ereignisorientierten als auch die kontinuierlichen digitalen Simulationssysteme haben sich historisch gesehen getrennt nach jeweils spezifischen Gesichtspunkten entwickelt [1] [6] bis [9] [11] [14] und [16]. In [12] wurde ein umfassender Überblick im kombinierten Fall gegeben. Thesenhaft kann man die Situation heute wie folgt charakterisieren:

- Die Klasse der kombinierten ereignisorientiert-diskreten und kontinuierlichen mathematischen Modelle gewinnt an Bedeutung.
- Die Abgrenzung von Aufgabenklassen, bei denen unter heutigen Zielstellungen eine Beschreibung mit Hilfe kombinierter Modelle notwendig ist, ist eine erkannte und wichtige Aufgabe.
- Für bestimmte Klassen kombinierter Modelle wurden digitale Simulationssysteme entwickelt.

1. Kombinierte Modelle

1.1. Zur Nomenklatur

Wir betrachten Modelle, die Zeitsysteme sind. Sie können zeitkontinuierlich oder zeitdiskret sein. Bezüglich der Struktur unterscheidet man zwischen strukturdiskreten und strukturkontinuierlichen Modellen, wobei letztere noch unterteilt werden in solche mit konzentrierten bzw. verteilten Parametern [5]. Die sich daraus ergebende Einteilung mit Beispielen wird in Tafel 1 gezeigt. Diese Einteilung in Systemklassen gilt auch für die Originalsysteme, die einer Simulation zugrunde liegen.

Tafel 1. Zur Verwendung der Begriffe diskret und kontinuierlich

Struktur	Zeit	
	diskret	kontinuierlich
diskret	Modelle des VOPS SIMDIS	Modelle in SIMULA NEDIS
kontinuierlich – konzentriert –	Differenzengleichungen	Differentialgleichungen – gewöhnlich –
kontinuierlich – verteilt –	Differenzengleichungen – partiell –	Differentialgleichungen – partiell –

Digitale Simulationssysteme werden bezeichnet und eingeteilt nach der jeweiligen Klasse mathematischer Modelle, die mit Hilfe der Simulationssprache beschrieben werden können. Dabei wird diskret im Sinn strukturdiskret und entsprechend kontinuierlich verwendet. Im Fall kontinuierlicher Modelle sind oft noch diskrete Ereignisse in Form unstetiger Veränderungen von Zustandsgrößen zugelassen, so daß die Bezeichnungsweise „vorwiegend kontinuierlich" sich einbürgert.

In einigen Arbeiten werden diese aber bereits als kombinierte Modelle bezeichnet. Es ist daher zweckmäßig, zwischen Zeitereignissen und Zustandsereignissen zu unterscheiden [2] und [13]. Die Bezeichnungsweise ereignisorientiert-diskrete Modelle bezieht sich dann auf solche mit Zeitereignissen. Im Fall kombinierter Modelle werden dann als Ereignisse sowohl Zeitereignisse als auch Zustandsereignisse zu betrachten sein.

1.2. Kombinierte Modelle

Kombinierte Modelle sind dadurch gekennzeichnet, daß sowohl Zeitereignisse als auch Zustandsereignisse zu betrachten sind sowie diskrete und kontinuierliche Strukturen auftreten. Vereinfacht kann man diese, als Systeme betrachtet, aufgebaut als Kopplung eines diskreten Teilsystems, mit einem kontinuierlichen Teilsystem ansehen, die aufeinander einwirken bzw. in Wechselwirkung stehen, wie dies Bild 1 demonstriert. Auf den Tatbestand, daß die o. a. Teilsysteme ihrerseits selbst wieder einen eigenen Systemaufbau haben können, darauf wird bei dieser Betrachtungsweise nicht näher eingegangen, obwohl dies im Zusammenhang mit der Nutzung eines bestimmten kombinierten Simulationssystems eine eigenständige Bedeutung haben kann. Als einfaches Beispiel wird ein Lift betrachtet, dessen Arbeitsbewegung von einer Etage zur anderen als dynamisches Teilsystem kontinuierlichen Typs und dessen Besetzung in der jeweiligen Etage unter Berücksichtigung von Warteschlangen, bezogen auf die Benutzer, als ereignisorientiert-diskretes Teilsystem betrachtet werde. Das kombinierte System wird als zeitkontinuierlich angesehen. Kombinierte Modelle bieten sich auch an bei der Modellierung des Verkehrsverhaltens an Straßenkreuzungen mit Lichtsignalanlagen, wenn man die unterschiedlichen fahrdynamischen Eigenschaften von Kraftfahrzeugen (auch unter Einschluß des Fahrers) mit berücksichtigen will.

Wenn bei einem kontinuierlichen Modell eine Kopplung von 2 Teilmodellen besteht, wobei das eine verteilte Parameter, das

---

[1]) Plenarvortrag auf der 6. Jahrestagung des FA Modellierung der WGMA.
Mitteilung aus der Humboldt-Universität zu Berlin, Sektion Mathematik.

andere kontinuierliche Parameter hat, so kann dies auch als kombiniert betrachtet werden, es soll aber mit der Zielstellung Simulation nicht als kombiniertes Modell bezeichnet werden. Bild 2 soll die Kombinationsmöglichkeiten verdeutlichen.

1.3. Modellierung

Will man unter Verwendung eines für einen Digitalrechner konzipierten Simulationssystems (digitales Simulationssystem) eine Aufgabenstellung als Simulation lösen, so wird man unter Berücksichtigung der Zielstellung zum Originalsystem ein geeignetes mathematisches Modell bilden, das sich mit den Mitteln der zugehörigen Simulationssprache beschreiben läßt. Von diesem direkt (oder einem daraus abgeleiteten mathematischen Modell, z. B. vereinfachten mathematischen Modell) wird ein diskretes Rechenmodell gebildet, das im Digitalrechner abarbeitungsfähig ist. Diesen letzten Schritt wird man dem digitalen Simulationssystem mit übertragen, ggf. unterstützt durch den Anwender. Bild 3 gibt dazu eine Übersicht unter Berücksichtigung der 3 Grundtypen von Modellen, wobei die kombinierten Modelle als Grundtyp betrachtet wurden. Für die Originalsysteme wurde keine Typeinteilung vorgenommen, da es für die Simulation primär nicht wichtig ist, welchen Typ sie repräsentieren, sondern durch welchen Typ sie bei einer bestimmten Zielstellung modelliert werden müssen. Für kontinuierliche digitale Simulationssysteme ist charakteristisch, daß die Warteschlangenproblematik im Sinn der diskreten digitalen Simulationssysteme nicht mit erfaßt werden kann. In viel umfassenderer Form bei Berücksichtigung der vollen Dynamik ist dies natürlich möglich [10], doch ist dann der Aufwand auch enorm größer. Dies unterstreicht noch einmal die Problematik der Auswahl einer geeigneten Modellklasse zur sachgemäßen Beschreibung eines Originalsystems unter Beachtung einer bestimmten Zielstellung. Bezüglich der Modellierung sei hier noch auf einige Arbeiten verwiesen, deren Inhalt naturgemäß auch bei kombinierten Modellen auf wichtige Modellierungsaspekte hinweist [4] [5] [8] und [20].

Bild 1. Vereinfachte Darstellung eines kombinierten Modells durch zwei Teilmodelle mit Wechselwirkung

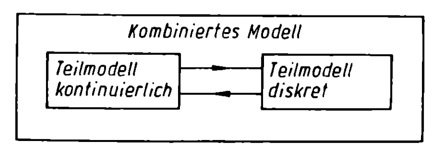


Bild 2. Zur Bildung kombinierter Modelle

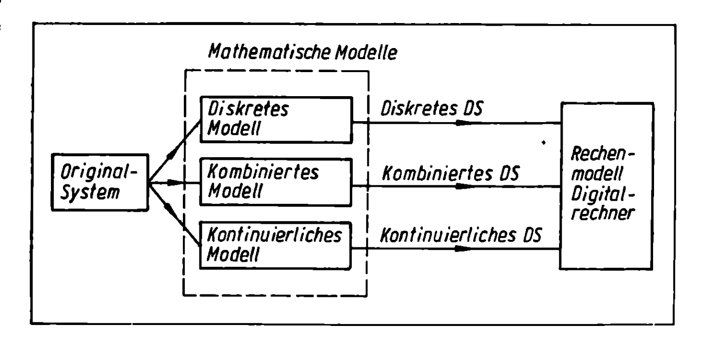


Bild 3. Mathematische Modelle als Basis digitaler Simulationssysteme (DS)

2. Beispiel

2.1. Globale Beschreibung

Das Beispiel soll gewisse Aspekte aus der Stahlproduktion beschreiben. Wie in [4] gezeigt, ist es zur näheren Beschreibung eines Modelles sehr zweckmäßig, auch noch seine unmittelbare Umgebung modellmäßig mit zu beschreiben, da man dann tiefer in das Verstehen des Modelles eindringen kann und den Zusammenhang mit der „Umwelt“ des Modelles präzisiert erfaßt und beschreibt. Dabei wurde eine solche Abgrenzung gewählt, daß gleichzeitig ein Beispiel für ein ereignisorientiert-diskretes Modell gebildet werden kann und somit Modellierungsprinzipien gleichzeitig mit aufgezeigt werden.

Wir betrachten den im Bild 4 gezeigten Ausschnitt aus der Stahlproduktion. Eingehender wollen wir das Arbeitsverhalten des Tiefofens studieren und aufzeigen, daß es bei der Bestimmung des Durchsatzes durch diesen Tiefofen notwendig ist, ein kombiniertes Modell zur Beschreibung zu wählen. Betrachtet man dagegen das Transportproblem für die Barren zwischen Schmelzofen und Tiefofen, so ist dafür ein diskret-ereignisorientiertes Modell angemessen, da in diesem Fall die dynamischen Eigenschaften des Tiefofens, wie sie durch Wärmeübergangsprobleme entstehen, hier keine Berücksichtigung finden müssen. Dieses Modell ist in [17] und [18] enthalten und zeigt grundsätzliche Eigenschaften des Transportsystems auf, die hier zur Demonstration der Auswahl des Modells für ein bestimmtes zielgerichtetes Verhalten eines Originalsystems angegeben werden. Auch in [13] werden analoge Probleme beschrieben.

2.2. Tiefofenmodell

Das Tiefofenmodell umfaßt zwei Zähler, einen Warteraum mit Warteschlange und den Tiefofen selbst, wie dies schematisch im Bild 5 dargestellt ist. Modellinput sind heiße gelieferte Barren. Ihre Ankunftszeit und Temperatur (zu diesem Zeitpunkt) werden durch stochastische Gesetzmäßigkeiten beschrieben. Auf den Transport, wie dies im Bild 4 dargestellt ist, wird in diesem Modell nicht näher eingegangen. Modelloutput sind dem Ofen entnommene und gezählte Barren, die eine Mindesttemperatur von 384 °C haben müssen. Alle 2 Zeiteinheiten wird überprüft, ob der Tiefofen einen Barren enthält, der diese Bedingung erfüllt. Ist dies der Fall, wird ein solcher Barren entnommen. Auch wird im Modell kein Aspekt berücksichtigt, der den Abtransport des Barrens betrifft. Nun geben wir die Aspekte näher an, die das Verhalten des Tiefofenmodelles primär bestimmen. Die Abfertigung an der Warteschlange erfolgt nach dem FIFO-Prinzip (first in-first out). Maximal 10 Barren können gleichzeitig aufgenommen werden. Jeder Barren wird durch eine lineare Differentialgleichung 1. Ordnung beschrieben, deren rechte Seite sich unstetig ändert (Zustandsereignis), wenn der Barren vom Warteraum in den Tiefofen wechselt. Dieser Übergang vom Warteraum zum Tiefofen wird als nicht zeitkonsumierend betrachtet. Für den Tiefofen selbst gilt eine lineare Differentialgleichung 1. Ordnung.

Folgende Ereignisse charakterisieren dieses kombinierte Modell:

- Eintreffen der Barren im Modell,
- Eintritt der Barren in die Warteschlange,
- Eintritt der Barren in den Tiefofen,
- Austritt der Barren aus dem Tiefofen,
- Austritt der Barren aus dem Modell,
- Änderung der Umgebungstemperatur beim Wechsel der Barren von der Warteschlange in den Ofen.

Das diskrete Teilmodell wird in seinem Verhalten durch folgende ganzzahlige Zustandsgrößen gekennzeichnet:

- Anzahl der das Modell betretenden Barren (Zählerstand Zähler 1)
- Länge der Warteschlange
- maximale Länge der Warteschlange
- Anzahl der Barren im Tiefofen
- Anzahl der das Modell verlassenden Barren (Zählerstand Zähler 2).

Das kontinuierliche Teilmodell wird in seinem Verhalten durch folgende reellwertigen Zustandsgrößen gekennzeichnet:

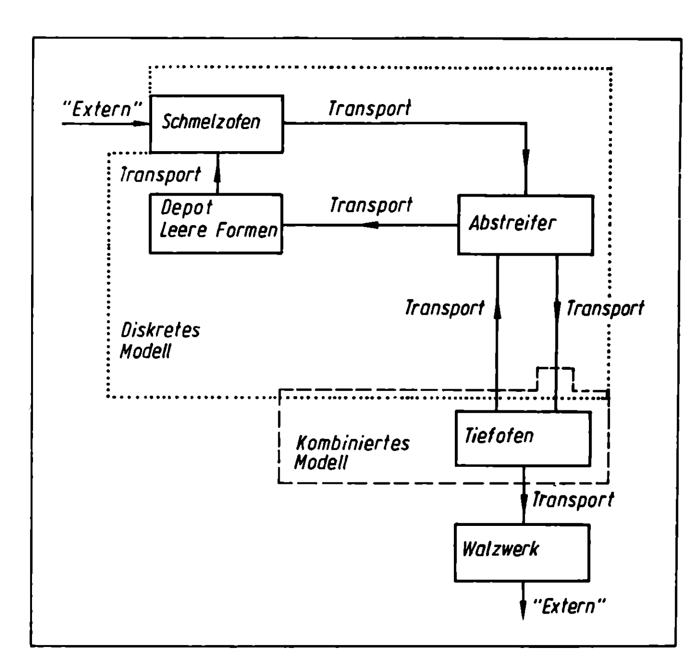


Bild 4. Zur Modellierung einiger Aspekte der Stahlproduktion

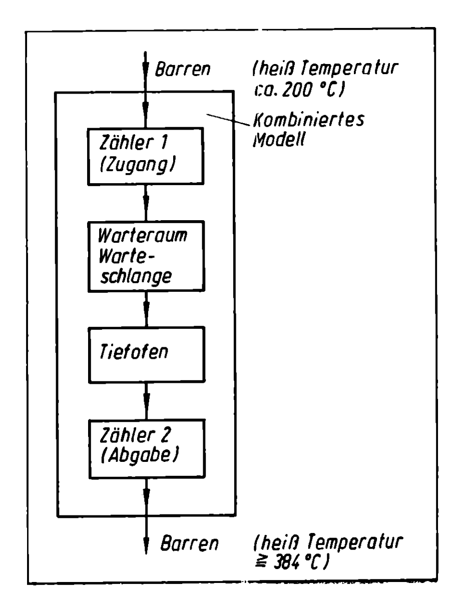


Bild 5. Abgrenzung des kombinierten Modells

- Temperatur des einzelnen Barrens (je Barren eine Zeitfunktion)
- Temperatur des Ofens.

2.3. *Aufgabenstellung*

Es ist nun zu fragen, welchen Einfluß hat die mittlere Ankunftszeit der Barren auf den Durchsatz durch den Ofen? Die Ankunftszeit wird als exponential verteilt angenommen, und es sollen die beiden Fälle

alle 4,5 Zeiteinheiten Ankunft eines Barrens (Mittelwert)
alle 3,0 Zeiteinheiten Ankunft eines Barrens (Mittelwert)

untersucht werden.

Dabei soll die Gleichung der Barren lauten:

$$\frac{\mathrm{d}Y_B(t)}{\mathrm{d}t} + Y_B(t) = \begin{cases} 25\ °\mathrm{C} \text{ falls Barren in Warteschlange} \\ X(t) \text{ falls Barren im Ofen} \end{cases}$$

$Y(t_0)$ zufällig, exponential verteilt mit mittlerer Temperatur 200 °C.

Für den Ofen soll gelten:

$$\frac{\mathrm{d}X(t)}{\mathrm{d}t} = (500\ °\mathrm{C} - X(t)) - \mathrm{BAZ} \cdot (X(t) - \mathrm{MBT})/5$$

$$X(0) = 400\ °\mathrm{C}.$$

BAZ Anzahl der Barren im Tiefofen, MBT mittlere Temperatur der Barren, die sich im Tiefofen befinden.

2.4. *Lösung*

Eine geeignete Methode, auf der Basis dieses kombinierten Modells eine Lösung der in Abschn. 2.3 formulierten Aufgabenstellung zu erhalten, ist die Simulation mit Hilfe eines Rechners. Diese wird bedeutend erleichtert, wenn ein für dieses Modell geeignetes kombiniertes digitales Simulationssystem zur Verfügung steht. In [17] wurde dieses Modell mit Hilfe von CADSIM entsprechend o. a. Aufgabenstellung durchgerechnet, und es ergab sich das folgende bemerkenswerte Resultat:

Nach 240 Zeiteinheiten waren im ersten Fall 42 Barren, im zweiten Fall aber nur 34 Barren aus dem Modell geliefert worden, d. h., das erhöhte Angebot an Barren (kleinere mittlere Ankunftszeit) führte nicht zu einem erhöhten Durchsatz. Diese Aussage betrifft bei der realisierten Rechnung das Einschwingverhalten des Systems, das durch das o. a. Modell beschrieben wird.

Abschließend sei bemerkt, daß also dem Prinzip nach alle diskreten und kontinuierlichen Zustandsgrößen und daraus durch Rechnung gewonnene Größen durch die Simulation beobachtet (also beim/nach dem Rechnen ausgegeben) werden können, doch soll dies für das o. a. Beispiel hier nicht weiter ausgeführt werden. In [3] bzw. [17] sind solche Angaben auch mit Demonstration der grafischen Ausgabe enthalten.

3. Kombinierte Simulationssysteme für Digitalrechner

3.1. *Vorbemerkungen*

Kombinierte Modelle können sowohl zur Anwendung von hybriden Rechnersystemen als auch von Digitalrechnern führen. Die Betrachtung der Hybridrechner ist ein Aspekt, der in dieser Darstellung nicht mit verfolgt wird. Ebenso soll die Frage der Simulation des Hybridrechners auf dem Digitalrechner hier nicht besonders ausgewiesen werden, obwohl auch hier der Fall kombinierter Modelle vorliegt, bzw., wenn man von der Simulation eines Programmes ausgeht, dann vorliegen kann, aber nicht

muß. Bezüglich eines umfassenden Überblickes über die Software zur Simulation kombinierter Modelle sei auf [12] hingewiesen.

Bei kontinuierlichen Simulationssystemen mit kontinuierlicher Zeit spielt beim Übergang vom mathematischen Modell zum Rechenmodell eine geeignete Realisierung der Integration eine entscheidende Rolle. Dabei unterscheidet man zwischen Methoden mit fester und mit variabler Schrittweite. Bei der Bildung kombinierter Simulationssysteme ist dann die Methode der Schrittweitensteuerung überlegen, da sie eine gute Möglichkeit bietet, ausreichend nahe an einen Ereigniszeitpunkt eines Ereignisses des mathematischen Modells heranzukommen, d. h., die grundsätzlichen Fehler des Rechenmodells gegenüber dem mathematischen Modell können, was diesen Aspekt anbelangt, hinreichend klein gehalten werden (der Anwender kann ja bei Schrittweitensteuerung die minimale zulässige Schrittweite vorgeben). Wir finden daher im kontinuierlichen Teil des kombinierten Simulationssystems schrittweitengesteuerte Integrationsverfahren.

3.2. *Verschiedene Typen kombinierter Simulationssysteme*

Die meisten kombinierten Simulationssysteme gehen davon aus, daß sowohl der diskrete als auch der kontinuierliche Anteil der Modelle eine kontinuierliche Zeit haben, d. h., gewöhnliche und teilweise auch partielle Differentialgleichungen sind zur Beschreibung des kontinuierlichen Modellanteiles zugelassen. Betrachten wir den kontinuierlichen Anteil näher, so kann dieser durch ein in standardisierter Form zu schreibendes System von Differentialgleichungen 1. Ordnung zu beschreiben sein (gleichungsorientiert) oder äquivalent zu einem Signalflußbild beschrieben werden, d. h. Beschreibung einzelner Elemente über Differentialgleichungen oder Gleichungen und Angabe der Koppelrelationen (blockorientiert). Außerdem kann sogar eine gemischte blockgleichungsorientierte Beschreibung dieses Modellanteils möglich sein. Bereits unter diesem Aspekt unterscheiden sich kombinierte Simulationssysteme deutlich, was für den Anwender wichtig ist, der ggf. mit einer bestimmten Methode Modelle zu beschreiben, langjährig vertraut ist. Aber auch der diskrete Anteil kann recht unterschiedlich in der Modellbeschreibung sein. Wir wollen hier nur die folgenden 3 Hauptrichtungen berücksichtigen: Konzept der Transaktionen, Prozeßkonzept, Konzept der Ereignisse. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte sollen einige typische Simulationssysteme aufgeführt werden (Tafel 2).

Tafel 2. Abkürzungen und Namen kombinierter Simulationssysteme

APLS	APL Simulation
CADSIM	Continuous und Discrete Simulation
CDCSIS	Combined Discrete-Continuous Simulations System
CDSP	Integrated Continuous and Discrete System Simulation Program
CLASS	Composite Language Approach for System Simulation
FOCUS	Fortran Oriented Control and Universal Simulator
GASP IV	General Activity Simulation Program IV
GASP V	
GASP-PL/1	
GEST	General System Theory Implementor
GSL	Generalized Simulation Language
HIESIM	Hierarchische Simulation
IGSL	Interactive Gaming Simulation Language
NEDIS	Nepreryvno-Diskretnye Sistemi
NGPSS	Norden's GPSS
SMOOTH	
SSL	System Simulation Language

GASP IV

Kontinuierlich gleichungsorientiert, gewöhnliche Differentialgleichungen 1. Ordnung, diskret ereignisorientiert.

Darüber hinaus sind Systeme von Differenzengleichungen 1. Ordnung möglich.

GASP V

Kontinuierlich gleichungsorientiert, gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen (Nutzung der Möglichkeiten des Programmpaketes FORSIM), diskret ereignisorientiert (Differenzengleichungen s. GASP IV).

CADSIM

Kontinuierlich gleichungsorientiert, gewöhnliche Differentialgleichungen 1. Ordnung (CLASS CONTINUOUS),
diskret prozeßorientiert (CLASS SIMULATION);

Der kontinuierliche Anteil wurde auch prozeßorientiert gestaltet, so daß CLASS CADSIM einen einheitlichen Aufbau hat.

NGPSS

Kontinuierlich block-gleichungsorientiert, indem CSMP III verwendet wurde;
diskret transaktionsorientiert, indem GPSS V verwendet wurde.

SMOOTH

Hier wird das bereits kombinierte Simulationssystem GASP IV mit GERT IIIZ kombiniert, so daß die volle Modellbeschreibung mit Hilfe von Netzwerken möglich wird.

CLASS

Kontinuierlich: CSSL

Diskret: SIMSCRIPT II und GPSS.

Damit stehen für den diskreten Modellanteil die Möglichkeiten der Modellbeschreibung über zwei verschiedene Grundtypen zur Verfügung.

FOCUS

Diese neue Entwicklung baut auf Elementen von GASP, GPSS, SIMSCRIPT und DYNAMO auf.

Naturgemäß ergeben sich sofort eine Reihe weiterer Fragen zur vertieften Kennzeichnung solcher Simulationssysteme wie

— Simulation im Dialog,
— Unterstützung bei der Realisierung von Simulationsexperimenten [15].

Hierauf wird nicht näher eingegangen und auf [12] und [15] verwiesen.

Literatur

[1] *Cellier, E. F.:* Continuous-System Simulation by use of Digital Computers. Simulation 75, Zürich, Proced., pp. 18 – 25.

[2] *Cellier, F. E.; A. E. Blitz:* GASP-V: A Universal Simulation Package. AICA-Kongress Delft 1976, pp. 391 – 402.

[3] *Cunningham, R. J.; F. N. Parr; Sim, R. J. W.:* An Introduction to Combined Continuous System and Discrete Event Process Simulation in Simula. London: Imperical College 1976.

[4] *Janac, K.:* Control of large power systems based on the situation recogniation and the high speed simulation. IX. Hawaii International Conference on System Sciences. Proceedings 1976, pp. 228 to 232.

[5] *Karplus, W. J.:* The Spectrum of Mathematical Modeling and Systems Simulation. AICA-Kongress Delft 1976, pp. 5 – 13.

[6] *Kindler, E.:* On the way to a mathematical theory of simulation. EIK 12 (1976) H. 10, S. 497 – 504.

[7] *Kindler, E.:* Classification of Simulation Programming Languages. EIK (in Vorbereitung).

[8] *Kleijnen, J. P.:* Discrete Simulation. AICA-Kongress Delft 1976, pp. 31–38.
[9] *Kreutzer, W.:* Comparison and Evaluation of Discrete Event Simulation Programming Languages for Managment Decision Making. AICA-Kongress Delft 1976, pp. 429–438.
[10] *Lam, Ch. F.; Pedersen, J.:* Continuous simulation of a complex queuing system. Simulation (1977) August, S. 42–48.
[11] *Nilsen, R.; Karplus, W. J.:* Continuous-System Simulation Languages: A State-of-the-Art Survey. Annales de XXX l' Association Internationale pour le Calcul analogique. (1974) No. 1, pp. 17–25.
[12] *Ören, T. I.:* Software for simulation of combined continuous and discrete systems: a state-of-the-art review. Simulation (1977) No. 2, pp. 33–44.
[13] *Pritsker, A. A. B.:* The Gasp IV Simulation Language. New York: John Wiley & Sons Ltd. 1974.
[14] *Schmidt, R.:* Literatur über diskrete Systemsimulation. ZfR 77.08, Vorträge der 2. Anwenderkonferenz diskreter Systemsimulation 1977, S. 88–96.
[15] *Schwarze, G.:* Automatisierung von Simulationsversuchen – Möglichkeiten – Notwendigkeiten –. 14. MEDA-Seminar Prag 1977, Teil 2, S. 72–85.
[16] *Schwarze, G.:* Bereitgestellte Software zur digitalen Simulation kontinuierlicher Systeme. msr **21** (1978) H. 3, S. 143–145.
[17] *Sim, R. J. W.:* Cadsim, Users Guide and Reference Manual. London: Imperical College 1975.
[18] *Surh, D.; Talavage, J.:* GASP IV Model of Ingot Processing. IX. Hawaii International Conference on System Sciences. Proceedings 1976, pp. 306–308.
[19] *Surh, D.; Talavage, J.:* A GASP IV model of steel ingot processing. Simulation (1977) No. 8, pp. 49–55.
[20] *Vansteenkiste, G. C.:* Modeling and Simulation in enviromental Systems. Simulation 75 Zürich, Proceed., pp. 608–613.
[21] *Gluschkov, V. M.,* u. a.: Programnye sredstva modelirovanija nepreryvno-diskretnych sistem (Nedis). Kiew: Naukova Dumka 1975.

msr 6601

Dr.-Ing. *H.-G. Hildebrandt* und Dipl.-Math. *A. Meißner*, Berlin[1])

Verhalten modelladaptiver Systeme mit Relais-Adaptionsgesetz

IA 2.5.4

Einleitung

Der Entwurf modelladaptiver Systeme nach der Empfindlichkeitstheorie bei Annahme eines quadratischen Gütefunktionals oder nach der Stabilitätstheorie, z. B. in Form der direkten Methode von *Ljapunov*, führt auf Adaptionsschleifen mit stetiger Informationsverarbeitung nach einem Adaptionsgesetz der Art

$$\Delta \dot{k}(t) = -K x_E(t)\, h(e(t)) \,. \qquad (1)$$

Dabei ergibt sich $x_E(t)$ bei Systemen mit Rückführung, d. h. bei geschlossenen Regelkreisen, als Ausgangssignal eines Übertragungsgliedes mit recht kompliziertem Aufbau, während $h(e(t))$ eine Funktion des Differenzsignals zwischen Bezugsmodell und Grundsystemausgang bzw. der zeitlichen Ableitungen des Differenzsignals ist [1].

Die gerätetechnische Implementierung solcher stetigen Adaptionsgesetze ist aufwendig, und die Parameterstellgeschwindigkeit ist abhängig von der Amplitude des Differenzsignals $e(t)$. Da an die Genauigkeit der Multiplikation der Signale keine hohen Anforderungen zu stellen sind, ist eine Systemvereinfachung und Verbesserung des dynamischen Verhaltens der Adaptionsschleife möglich, indem die Informationsverarbeitung in der Adaptionsschleife unstetig ausgeführt und die analoge Multiplikation durch eine logische Operation ersetzt wird.

Systeme, deren Parameteränderungsgeschwindigkeit von der Amplitude des Differenzsignals $e(t)$ unabhängig ist, ergeben sich nach dem Gradientenverfahren unter Verwendung eines Gütefunktionals mit der Funktion $f(e) = |e|$ und haben die Form

$$\Delta \dot{k}(t) = -K\big(x_E(t) \operatorname{sign} e(t)\big) \,. \qquad (2)$$

Adaptionsgesetze der Art

$$\Delta \dot{k}(t) = -K\big(\operatorname{sign} x_E(t) \cdot \operatorname{sign} h(e(t))\big) \qquad (3)$$

ergeben Systeme, deren Parameteränderungsgeschwindigkeit auch unabhängig von der Amplitude des Signals $x_E(t)$ ist. Sie vermeiden damit die Multiplikation stetiger Signale.

Grundsätzliche Strukturen zur Klassifikation dieser Systeme sind in [2] und [3] enthalten. Danach werden Adaptionsgesetze gemäß Gl. (1) bilineare Algorithmen, Algorithmen nach Gl. (2) Linear-Relais-Algorithmen und solche nach Gl. (3) Relais-Algorithmen genannt.

Adaptionsgesetze nach Gl. (3) für Grundsysteme ohne Rückführung werden von *Doganovskij* [4] abgeleitet. *Zemljakov*, *Pavlov* und *Rutkovskij* [5] stellen ein I-Relais-Gesetz für ein modelladaptives Identifikationssystem mit festeingestelltem Bezugsmodell vor und untersuchen Stabilität und stationären Fehler der Parameterverstellung.

Zu Relais-Algorithmen gelangt man auch, wenn von den Empfindlichkeitsfunktionen des Systems ausgegangen wird, wie *Serdjukov* [6] zeigt. Dieser Ansatz führt durch die Verwendung der vollständigen Empfindlichkeitsfunktionen zu sehr aufwendigen Systemen, die sich gerätetechnisch nicht exakt realisieren lassen. Notwendige Systemvereinfachungen führen dann wieder zu Algorithmen nach Gl. (3). In [7] zeigt *Serdjukov*, daß es möglich ist, unter Verwendung der direkten Methode von *Ljapunov* den Stabilitätsnachweis für alle Algorithmen nach den Gln. (1) bis (3) zu führen.

Im folgenden werden Adaptionsgesetze mit Relais-Anteil auch für den Fall der adaptiven Regelung mit festeingestelltem Bezugsmodell abgeleitet und zur Einschätzung ihrer Konvergenzgeschwindigkeit mit rein stetigen Varianten verglichen. Für die Dimensionierung der Adaptionsschleifenverstärkung ergeben sich daraus erste Hinweise.

1. Entwurf von Adaptionsgesetzen mit Relais-Anteil

Zum Entwurf von Adaptionsgesetzen mit Relais-Anteil sind anwendbar

- das Gradientenverfahren
- heuristische Überlegungen zur Wahl des Parameterstellsignals in Verbindung mit Verfahren der Stabilitätstheorie.

Nach dem Gradientenverfahren [1] ergibt sich das Adaptionsgesetz gemäß Gl. (2) mit der Bewertungsfunktion

$$f(e(t)) = |e(t)| \qquad (4)$$

[1]) Mitteilung aus dem Institut für Regelungstechnik im VEB Kombinat Elektro-Apparate-Werke Berlin.

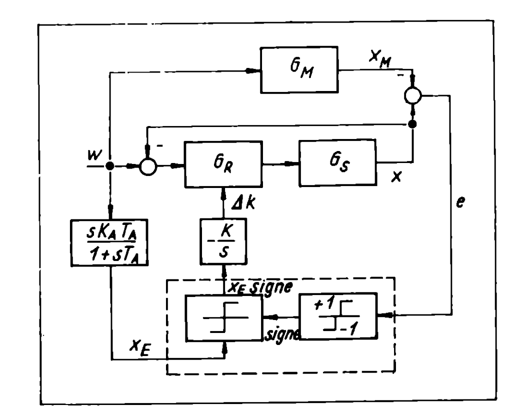


Bild 1. Realisierungsvariante für ein adaptives System mit Rückführung nach dem Adaptionsgesetz der Gl. (7)

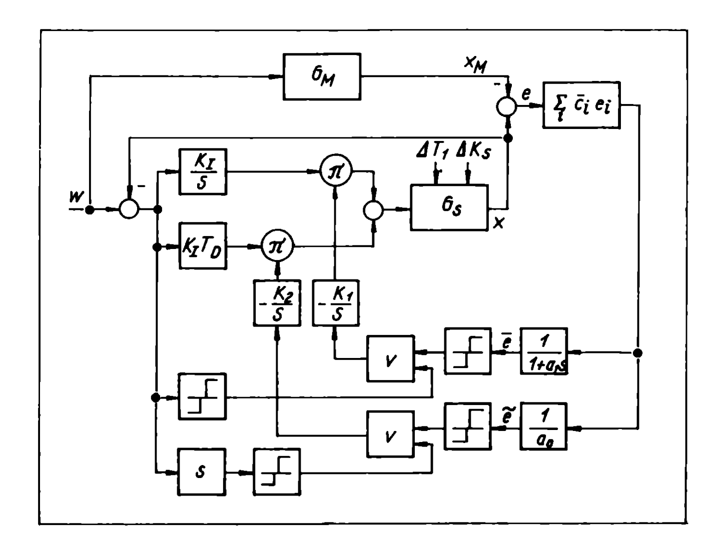


Bild 2. Signalflußbild eines adaptiven Systems nach den Adaptionsgesetzen der Gln. (15) und (17)

für das Differenzsignal $e(t)$ über die Definition von

$$\frac{\partial f}{\partial e} = \operatorname{sign} e(t) = \begin{cases} 1 & \text{für} \quad e(t) > 0 \\ 0 & \text{für} \quad e(t) = 0 \\ -1 & \text{für} \quad e(t) < 0 \end{cases} \tag{5}$$

und

$$\frac{\partial e\big(\boldsymbol{P}_{\mathrm{R}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{S}}(t))\big)}{\partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{R}}} = x_{\mathrm{E}}(t)\,,$$

wobei $\boldsymbol{P}_{\mathrm{R}}$ die steuerbaren, d. h. Reglerparameter, und $\boldsymbol{P}_{\mathrm{S}}(t)$ die variablen Streckenparameter beinhalten. Für ein System mit Rückführung

$$G_{\mathrm{w}}(s) = \frac{G_{\mathrm{R}}(s)\, G_{\mathrm{S}}(s)}{1 + G_{\mathrm{R}}(s)\, G_{\mathrm{S}}(s)} \tag{6}$$

und steuerbarer Reglerverstärkung $K_{\mathrm{I}} = K_{\mathrm{I0}} + \Delta k$ kann das Adaptionsgesetz in der Form

$$\Delta\dot{k}(t) = -K \cdot \mathfrak{L}^{-1}\left\{\frac{K_{\mathrm{A}} T_{\mathrm{A}} s}{1 + s T_{\mathrm{A}}}\, w(s)\right\} \operatorname{sign} e(t) \tag{7}$$

approximiert werden. Im Bild 1 ist eine Realisierungsvariante für dieses System dargestellt.

Zur Ableitung eines Adaptionsgesetzes mit I-Relais-Verhalten wird Gl. (6) ausführlicher geschrieben. Für einen Regler mit PI-Verhalten

$$G_{\mathrm{R}}(s) = \frac{K_{\mathrm{I}}}{s} \cdot (1 + s T_{\mathrm{D}}) \tag{8}$$

und P-Strecke mit Verzögerung 2. Ordnung (T_1, T_2) folgt dann

$$G_{\mathrm{w}}(s) = \frac{a_0 + a_0 a_1 s}{a_0 + (1 + a_0 a_1)\, s + a_2 s^2 + a_3 s^3} \tag{9}$$

$$\left.\begin{aligned} a_0 &= a_0(t) = K_{\mathrm{S}}(K_{\mathrm{I}} + \Delta k(t)) = \bar{a}_0 + K_{\mathrm{S}}\, \Delta k(t)\,; \\ a_1 &= a_1(t) = T_{\mathrm{D}} + \Delta T_{\mathrm{D}}(t)\,; \\ a_2 &= T_1 + T_2\,; \\ a_3 &= T_1 \cdot T_2\,. \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

Als Bezugsmodell wird ein System gleicher Ordnung, das durch die Differentialgleichung

$$N_{\mathrm{M}}(p)\, x_{\mathrm{M}}(t) = Z_{\mathrm{M}}(p)\, w(t) \tag{11}$$

mit $p = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}$ beschrieben wird, verwendet. Für das Differenzsignal $e(t)$ ergibt sich

$$N_{\mathrm{M}}(p)\, e(t) = K_{\mathrm{s}}\, \Delta k (1 + a_1 p)\, x_{\mathrm{w}} + a_0\, \Delta T_{\mathrm{D}} p x_{\mathrm{w}} = f(t)\,. \tag{12}$$

Da Δk für $a_1 =$ konst. auch in der Form

$$\Delta k = \mathfrak{L}^{-1}\left\{\frac{K_{\mathrm{s}}^{-1} N_{\mathrm{M}}(s)}{1 + a_1 s}\right\} \cdot \frac{x_{\mathrm{w}}}{x_{\mathrm{w}}^2} \tag{13}$$

geschrieben werden kann, gilt

$$\begin{aligned} \operatorname{sign} \Delta k &= \operatorname{sign} \mathfrak{L}^{-1}\left\{\frac{N_{\mathrm{M}}(s)\, K_{\mathrm{s}}^{-1}}{1 + a_1 s}\, e(s)\right\} \cdot \operatorname{sign} x_{\mathrm{w}}(t) \\ &= \operatorname{sign} \bar{e}(t) \operatorname{sign} x_{\mathrm{w}}(t)\,, \end{aligned} \tag{14}$$

und für Δk kann als Adaptionsgesetz

$$\Delta\dot{k}(t) = -K_1 (\operatorname{sign} \bar{e} \operatorname{sign} x_{\mathrm{w}}) \tag{15}$$

angesetzt werden. Durch analoge Überlegungen ergibt sich für den Parameter T_{D} nach Gl. (8) $a_1 = T_{\mathrm{D}} + \Delta T_{\mathrm{D}}(t)$ als Adaptionsgesetz

$$\Delta\dot{T}_{\mathrm{D}}(t) = -K_2 (\operatorname{sign} \tilde{e} \operatorname{sign} x_{\mathrm{w}}) \tag{16}$$

mit

$$\tilde{e} = \mathfrak{L}^{-1}\left\{\frac{1}{K_{\mathrm{s}} K_{\mathrm{I}}}\, N_{\mathrm{M}}(s)\, e(s)\right\}. \tag{17}$$

Die Ableitung von Adaptionsgesetzen mit Relais-Anteil für Systeme ohne Rückführung kann analog erfolgen und soll deshalb hier nicht gezeigt werden. In beiden Fällen ergeben sich weitere Varianten unter der Berücksichtigung der Differentialquotienten des Differenzsignals.

Bild 2 zeigt das Signalflußbild eines Systems nach den Adaptionsgesetzen der Gln. (15) und (17). In Tafel 1 sind verschiedene Adaptionsgesetze mit I- und I-Relais-Verhalten sowohl für Systeme mit Rückführung als auch für Systeme ohne Rückführung zusammengestellt.

2. Stabilitätsnachweis

Die Stabilität adaptiver Systeme mit Relais-Verhalten bzw. die Existenz von Stabilitätsgebieten für diese Systeme kann mit Hilfe der direkten Methode von *Ljapunov* nachgewiesen werden. Für die Ljapunov-Funktion ist dazu der Ansatz

$$V(\boldsymbol{\varepsilon}) = \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{R} \boldsymbol{\varepsilon}\,, \tag{18}$$

wobei $\boldsymbol{\varepsilon}^T = (e, \dot{e}, \ldots e^{(n)})$ ist, mit beliebiger symmetrischer Matrix $\boldsymbol{R}$ ausreichend.

Tafel 1. Zusammenstellung der experimentell untersuchten Systeme

Grundsystem	Adaptionsgesetz	Kennzeichnung
System ohne Rückführung		
$G(s) = \frac{K}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}$	$\Delta\dot{k}(t) = -Kx_M(t) \operatorname{sign} e(t)$	a
	$\Delta\dot{k}(t) = -K \operatorname{sign} x_M(t) \operatorname{sign} e(t)$	b
$K = K_0 + \Delta k(t)$	$\Delta\dot{k}(t) = -Kx_M(t)\, e(t)$	c
	$\Delta\dot{k}(t) = -K(K_1 e(t) + K_2\dot{e}(t))w(t)$	d
System mit Rückführung		
$G_w(s) = \frac{G_S G_R}{1 + G_S G_R}$	$\Delta\dot{k}(t) = -K\dot{w}(t) \operatorname{sign} e(t)$	e
	$\Delta\dot{k}(t) = -K \operatorname{sign}(e(t) + \dot{e}(t)) \times \times \operatorname{sign} x_M(t)$	f
$G_S = \frac{K_S}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}$	$\Delta\dot{k}(t) = -K \operatorname{sign}(e(t) + \dot{e}(t)) \times \times \operatorname{sign} x_w(t)$	g
	$\Delta\dot{k}(t) = -K \operatorname{sign} \bar{e}(t) \operatorname{sign} x_w(t)$	h
$G_R = \frac{K_I}{s}(1 + sT_D)$	$\Delta\dot{k}(t) = -K(e(t) + \dot{e}(t))\, x_M(t)$	i
	$k(t) = -K(e(t) + \dot{e}(t))\, x_w(t)$	k
$K_I = K_{I0} + \Delta k(t)$		

Für ein Grundsystem nach Gl. (9) und dem Bezugsmodell gleicher Ordnung mit der Übertragungsfunktion

$$G_M(s) = \frac{c_0 + c_1 s}{d_0 + d_1 s + d_2 s^2 + d_3 s^3} \tag{19}$$

ergeben sich aus der zeitlichen Ableitung der Ljapunov-Funktion

$$\dot{V}(\boldsymbol{\varepsilon}) = \boldsymbol{\varepsilon}^T(\boldsymbol{A}_M^T \boldsymbol{R} + \boldsymbol{R}\boldsymbol{A}_M)\,\boldsymbol{\varepsilon} + 2\boldsymbol{r}_n \boldsymbol{\varepsilon} f(t) \tag{20}$$

mit $\boldsymbol{A}_M^T \boldsymbol{R} + \boldsymbol{R}\boldsymbol{A}_M = -\boldsymbol{E}$, die Stabilitätsbedingungen

$$\frac{\boldsymbol{r}_n \boldsymbol{\varepsilon}}{d_3} K_s \,\Delta k(x_w + a_1 \dot{x}_w) \leqq 0 \tag{21}$$

$$\frac{\boldsymbol{r}_n \boldsymbol{\varepsilon}}{d_3} a_0 \,\Delta T_D \dot{x}_w \leqq 0\,, \tag{22}$$

wobei $\boldsymbol{r}_n$ die n-te Zeile der Matrix $\boldsymbol{R}$ ist. Gilt nur $x_w + a_1\dot{x}_w > 0$ bei $\dot{x}_w > 0$ und $x_w + a_1\dot{x}_w < 0$ bei $\dot{x}_w < 0$, so ist die Stabilität des Bezugsmodell-Systems für $x_w + a_1\dot{x}_w = 0$ u. U. gestört, d. h., bei einem Verlauf von

$$x_w = \pm x_{w_0} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{1}{a_1}t} \quad \text{für} \quad t \in [t_1, t_2] \tag{23}$$

sind die Forderungen an die Ljapunov-Funktion nicht erfüllt. Sie sind erfüllt bei

$$x_w \neq \pm x_{w_0} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{1}{a_1}t} \quad \text{für} \quad t \in [t_1, t_2]\,. \tag{24}$$

Gilt $x_w \equiv 0$ für t aus einem Intervall $[t_1, t_2]$, so gilt $\dot{x}_w = 0$ in dem offenen Intervall (t_1, t_2), d. h., die Forderungen an die Ljapunov-Funktion sind dort erfüllt. Das System kann begrenzte Schwingungen ausführen, deren Amplitude je nach Erfüllung der Stabilitätsbedingung veränderlich ist. Es ist stabil im Großen, aber instabil im Kleinen und weist einen Grenzzyklus auf.

Aus der Stabilitätsbedingung der Gl. (21) folgt die Forderung

$$\operatorname{sign} \frac{\boldsymbol{r}_n \boldsymbol{\varepsilon}}{d_3} K_s(x_w + a_1\dot{x}_w) \neq \operatorname{sign} \Delta k(t)\,. \tag{25}$$

Wenn $x_w > a_1\dot{x}_w$ erfüllt ist, gilt $\operatorname{sign}(x_w + a_1\dot{x}_w) = \operatorname{sign} x_w$, da $d_3, K_s, a_0 > 0$ sind. Wird ferner vorausgesetzt, daß $\operatorname{sign}(\boldsymbol{r}_n\boldsymbol{\varepsilon}) = \operatorname{sign} \bar{e}(t)$ ist, so wird für ein Adaptionsgesetz nach Gl. (15) die Forderung von Gl. (25) erfüllt. Analog folgt aus der Stabilitätsbedingung der Gl. (22) für ein System mit dem Adaptionsgesetz gemäß Gl. (16) die Forderung

$$\operatorname{sign} \frac{\boldsymbol{r}_n \boldsymbol{\varepsilon}}{d_3} a_0 \dot{x}_w \neq \operatorname{sign} \Delta T_D(t)\,, \tag{26}$$

die für $\operatorname{sign} x_w = \operatorname{sign} \dot{x}_w$ immer erfüllt ist.

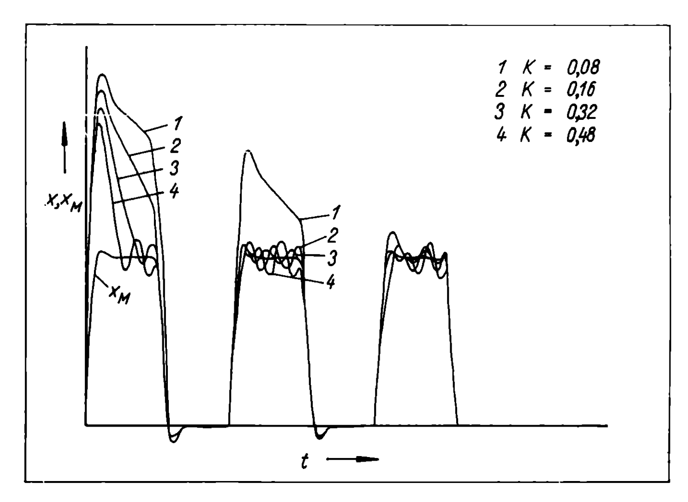


Bild 3. Ausgangssignalverlauf $x(t)$ eines Systems ohne Rückführung nach dem Adaptionsgesetz a der Tafel 1

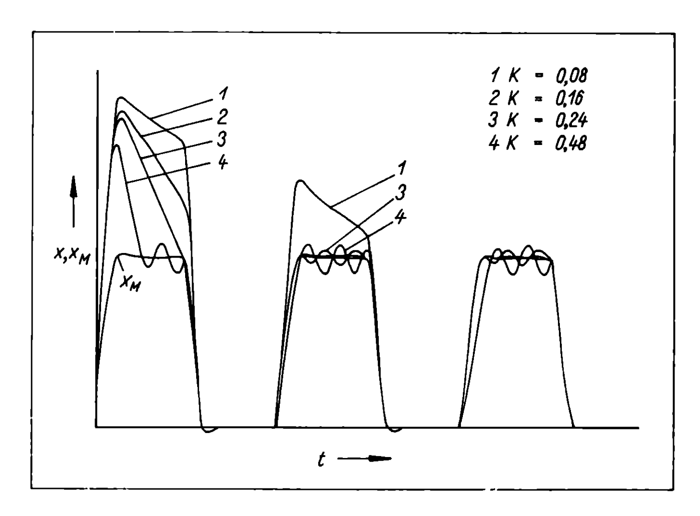


Bild 4. Ausgangssignal $x(t)$ eines Systems ohne Rückführung nach dem Adaptionsgesetz b der Tafel 1

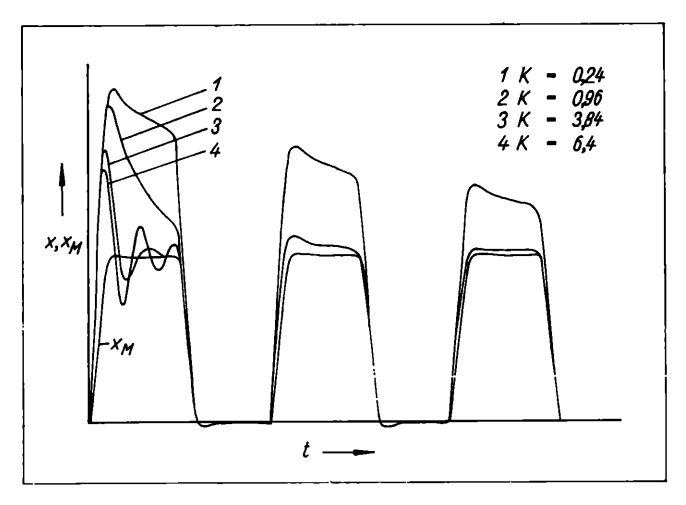


Bild 5. Ausgangssignal $x(t)$ eines Systems ohne Rückführung nach dem Adaptionsgesetz c der Tafel 1

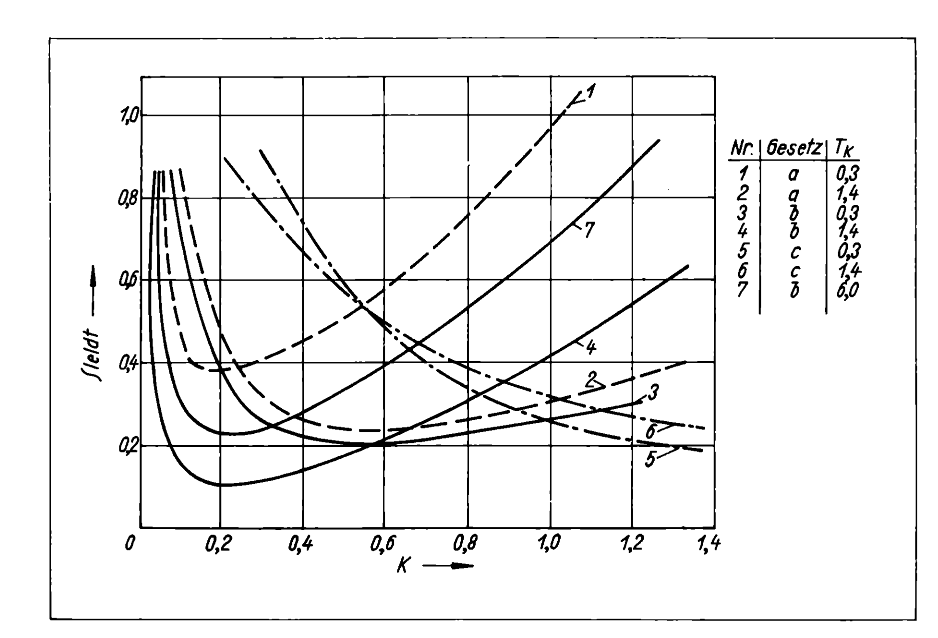


Bild 6. Darstellung der Funktion

$$I(t_0) = \int_0^{t_0} |e(t)| dt = f(K, T_k)$$

für ein System ohne Rückführung

Tafel 2. Optimale Einstellwerte K_{opt} für Systeme ohne Rückführung

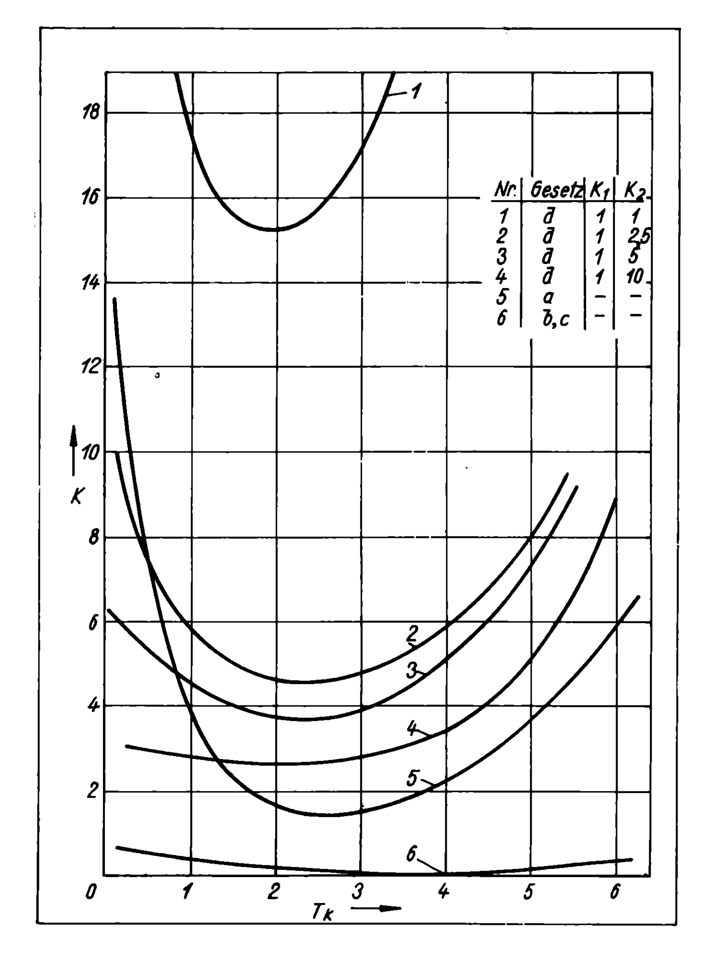
K_1	K_2	K_{opt}
1,0	1,0	$2{,}3\ T_k^2 - 9{,}94 T_k + 25{,}58$
1,0	2,5	$0{,}94 T_k^2 - 4{,}08 T_k + 10{,}07$
1,0	5,0	$0{,}56 T_k^2 - 2{,}49 T_k + 6{,}47$
1,0	10,0	$0{,}25 T_k^2 - 1{,}2\ T_k + 3{,}08$

Die Ungleichungen (21) und (22) sind technisch immer, zumindest für $t > t_1$, erfüllbar, wenn Δk als

$$\Delta k(t) = \Delta k_0 - K_1 \int_0^{t_1} (\operatorname{sign} \bar{e}(\tau) \operatorname{sign} x_w(\tau) \, d\tau) \tag{27}$$

mit $|\Delta k_0| < K_1 \leqq K_{1\,max}$ und entsprechend $|\Delta T_{D0}| < K_2 \leqq K_{2\,max}$ gesetzt wird. $K_{i\,max}$ wird durch das dynamische Verhalten des Bezugsmodell-Systems bestimmt und ist experimentell zu ermitteln.

Bild 7. Darstellung der Funktion $K_{opt} = f(T_k)$



3. Experimentelle Untersuchungen

Zur Untersuchung und zum Vergleich der Konvergenzgeschwindigkeit, des Einflusses additiver Störgrößen sowie zur Ermittlung optimaler Einstellwerte für die Adaptionsschleifenverstärkung wurden die Systeme nach Tafel 1 auf dem Analogrechner ADT 3000 simuliert.

Die Bilder 3 bis 5 zeigen für ein System ohne Rückführung mit Verzögerung 2. Ordnung den Verlauf des Ausgangssignals $x(t)$ bei sprungförmig verändertem Übertragungsfaktor $K_s = 1 \to 2$ in Abhängigkeit der Adaptionsschleifenverstärkung K für die Adaptionsgesetze a bis c nach Tafel 1. Es zeigt sich:

- Die Adaptionsgesetze a bis c sind grundsätzlich zur Adaption des Parameters $K_s(t)$ anwendbar.
- Im Gegensatz zur stetigen Variante c liefern die Gesetze mit Relais-Verhalten a und b einen Prozeß mit stationärer Arbeitsschwingung im Verlauf des Signals $x(t)$.
- Die Amplitude der Arbeitsschwingung ist der Verstärkung K proportional. Bei großen Werten von K kann das System instabil werden. Es ist deshalb ratsam, eine Totzone in das System einzuführen, deren Breite von der zulässigen Toleranz für die Parametereinstellung abhängig ist.
- Im Vergleich zur stetigen Variante ist bei den Relais-Gesetzen der Stabilitätsbereich in Abhängigkeit von K erheblich eingeschränkt.

Diese Aussagen gelten auch für Systeme mit Rückführung. Im Bild 6 ist die Funktion

$$I(t_0) = \int_0^{t_0} |e(t) \, dt| = f(K, T_k) \tag{28}$$

als Gütekriterium für die Adaption eines Systems ohne Rückführung mit den Adaptionsgesetzen a bis c nach Tafel 1 dargestellt. Es zeigt sich, daß $I(t_0)$ in Abhängigkeit von K ein Minimum bei K_{opt} durchläuft. Dieser Wert K_{opt} kann als optimale Einstellung des Systems bezüglich Adaptionsgeschwindigkeit und Amplitude des Differenzsignals $e(t, \Delta K_s)$ angesehen werden. Er ist abhängig vom dynamischen Verhalten des Grundsystems. Im Bild 7 ist deshalb $K_{opt} = f(T_k)$ mit $T_k = T_1 + T_2$ für die Adaptionsgesetze a bis d der Tafel 1 dargestellt. Insbesondere für das Adaptionsgesetz d wird die Wahl des optimalen Wertes K_{opt} kritisch und beeinflußt erheblich die Adaptionsgüte des Systems. Die Funktionen $K_{opt} = f(T_k)$ können jedoch hinreichend genau durch Polynome 2. Grades approximiert werden, und es ergeben sich für den Bereich $0{,}5 \leqq T_k \leqq 5$ die in Tafel 2 zusammengestellten Beziehungen für K_{opt}.

msr 6651 (Beitrag wird fortgesetzt)

Dr.-Ing. *R. Wolf* und Dipl.-Ing. *K. Fiedler*, Magdeburg[1])

Elektronische Schaltungen der Automatisierungstechnik (XI)

Eingangsbrücken zur Meßbereichsorganisation

IA 4.0

Eingangsbrückenschaltungen sind in fast allen Geräten zu finden, die die Eingangssignale von Fühlern direkt verarbeiten. Bislang wurden ausschließlich passive Brückenanordnungen verwendet, da mit ihnen eine höhere Konstanz der Parameter gegenüber aktiven Brückenschaltungen unter Betriebsbedingungen erreicht werden konnte. Die Struktur von Eingangsbrückenschaltungen wurde an die besonderen Gebrauchswertforderungen in Automatisierungsgeräten angepaßt.

1. Struktur von Eingangsschaltungen

Die Eingangsschaltung hat die Aufgabe, den Meßfühler, der eine zu messende physikalische Größe wie Temperatur, Druck, Dehnung, Kraft usw. in ein elektrisches Signal umformt, an den folgenden Verstärkerteil anzupassen. Das elektrische Ausgangssignal des Fühlers kann eine Spannung (Thermoelement), ein Widerstand (Widerstandsferngeber, DMS, Widerstandsthermometer) oder ein Strom (Analysenmeßtechnik) sein. In allen Gerätestrukturen folgen nach den Eingangsschaltungen Verstärker, die je nach geforderter Eingangsempfindlichkeit und Genauigkeit direktgekoppelte Verstärker oder Modulationsverstärker sein können [1]. Sie benötigen als Eingangsgrößen Strom oder Spannung, woraus sich eine Umwandlung passiver Eingangsgrößen in Strom oder Spannung ableitet. Für diese Umwandlung benutzt man modifizierte Brückenschaltungen, die Ähnlichkeit mit der bekannten Wheatstoneschen Brücke

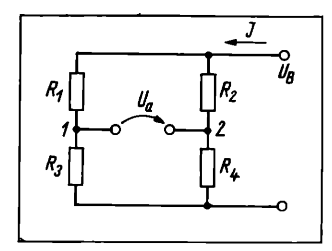


Bild 1. Wheatstonesche Brücke

(Bild 1) haben. Für den Brückenstrom gilt mit R_5 als Diagonalwiderstand zwischen den Punkten *1* und *2* und R_6 als Innenwiderstand der Quelle U_B [2]:

$$I_D = U_B \frac{R_1R_4 - R_2R_3}{R_5(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} \tag{1}$$

$$U_B = E - I \cdot R_6 \,. \tag{2}$$

Da beim Anschluß eines Verstärkers mit hohem Eingangswiderstand an die Brücke der Widerstand R_5 identisch mit dem hohen Eingangswiderstand des Verstärkers ist, wird der Querstrom I_D sehr klein und liegt in der Größenordnung 10^{-9} bis 10^{-6} A. Für Gl. (1) kann vereinfachend geschrieben werden:

$$I_D \approx U_B \frac{R_1R_4 - R_2R_3}{R_5(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} \,. \tag{3}$$

Um nur geringe Nichtlinearitäten und gleichzeitig eine hohe Steilheit der Kennlinie zu erhalten, werden die Brücken im Nullverfahren betrieben. Damit wird im Abgleichfall der Diagonalstrom Null, und der Innenwiderstand der Brücke wird theoretisch unendlich groß

$$R_1R_4 - R_2R_3 = 0$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \,. \tag{4}$$

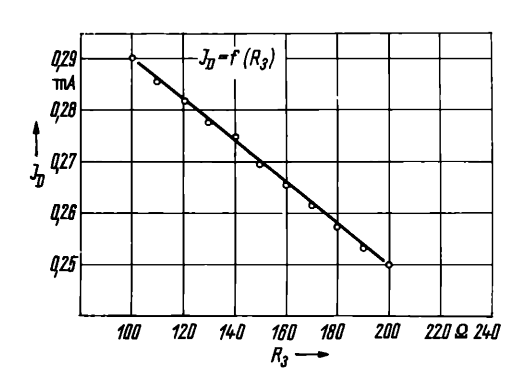


Bild 2. Kennlinie der Wheatstoneschen Brücke als Funktion des Widerstandes R_3

$100\ \Omega \leqq R_3 \leqq 200\ \Omega$
$R_1 = R_2 = R_4 = 1\ \mathrm{k}\Omega$
$U_B = 10\ \mathrm{V}$
$R_5 = 1\ \mathrm{M}\Omega$

Gleichung (4) wird als Abgleichbedingung für die Wheatstonesche Brücke bezeichnet. Im Bild 2 ist die Kennlinie einer Wheatstoneschen Brücke in Abhängigkeit vom Widerstand R_3 dargestellt. Wird an Stelle des Widerstandes R_3 ein Widerstandsthermometer Pt100 verwendet, das einen Grundwiderstand von 100 Ω hat, dann ergibt sich für den Änderungsbereich $\Delta R_3 = 100\ \Omega$ ein möglicher Temperaturmeßbereich von etwa 0 °C bis 250 °C. Die Umwandlungssteilheit, die als

$$S = \frac{\Delta A}{\Delta E} \tag{5}$$

definiert werden kann, ergibt mit $A = I_D$ und $E = R_3$ für die Kennlinie nach Bild 2:

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta R_3} = -0{,}4\ \mu\mathrm{A}/\Omega \,. \tag{6}$$

Soll eine höhere Steilheit erzielt werden, müssen entweder die Dimensionierungsbedingungen geändert werden (R_2 hochohmig; R_1, R_4 niederohmig), oder es müssen zwei Widerstände verstimmt werden. Zweckmäßig wäre es, hier den Widerstand R_2 zusätzlich zu verstimmen. In Tafel 1 sind die Werte für den Fall der Verstimmung von R_3 und der Verstimmung von R_2/R_3 angegeben.

Die Steilheit bei Verstimmung von zwei Widerständen (R_2; R_3), die mit gleichen Werten erfolgen soll, läßt sich aus Tafel 1 errechnen:

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta R_{2/3}} = 0{,}5\ \mu\mathrm{A}/\Omega \,. \tag{7}$$

Damit ergibt sich bei Verstimmung von zwei Widerständen der Brücke im Vergleich zur Verstimmung nur eines Widerstandes

[1]) Teil X erschien im H. 1/1979.

Tafel 1. Diagonalstrom in Abhängigkeit von der Verstimmung der Wheatstoneschen Brücke

R/Ω	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
I_D/mA für $R = R_3$	0,29	0,286	0,282	0,278	0,274	0,27	0,266	0,262	0,258	0,254	0,25
I_D/mA für $R = R_2 = R_3$	0,45	0,445	0,44	0,435	0,43	0,425	0,42	0,415	0,41	0,405	0,40

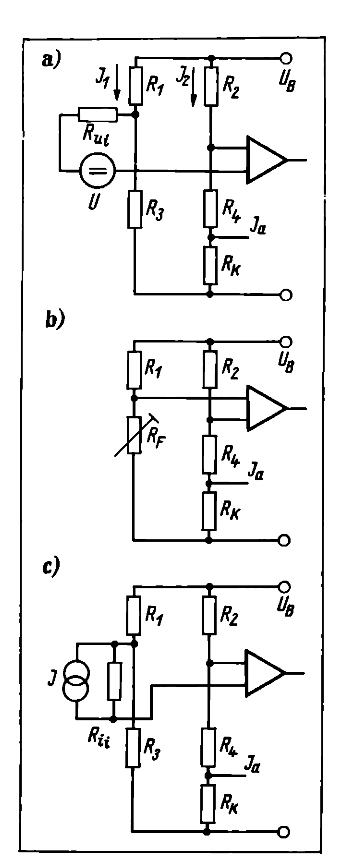


Bild 3
Eingangsschaltung mit Fühlern

a) Spannungsquelle, z. B. Thermoelement; b) Widerstand, z. B. Pt 100; c) Stromquelle, z. B. Analysenmeßzelle

R_{ui} Innenwiderstand der Spannungsquelle; R_{ii} Innenwiderstand der Stromquelle; R_F Widerstandsfühler; U Spannungsquelle; I Stromquelle; R_K Kompensationswiderstand

eine Erhöhung der Steilheit um 20% bei den angegebenen Dimensionierungsbedingungen. In der Praxis werden jedoch auf Grund der Eigenschaften der Fühler, insbesondere der auftretenden Fertigungstoleranzen, bedingt durch Materialeigenheiten und -reinheitsfaktoren und dem erhöhten Aufwand, zwei Fühler gleichzeitig nur bei Differenzmessungen an eine Brücke angeschlossen. Für eine Differenzmessung, wie sie beispielsweise bei thermischen Prozessen notwendig ist, müßten z. B. an Stelle der Widerstände R_1 und R_3 Fühler angeschlossen werden.

Die Wheatstonesche Brücke wird direkt nur für die Widerstandsmessung benötigt, wobei sie die Aufgabe hat, die auftretende Widerstandsänderung in eine äquivalente Spannungsänderung umzuformen, die ein folgender Verstärker weiterverarbeitet. Um die Quelle nicht zu belasten, muß der Verstärker einen möglichst hohen Eingangswiderstand haben, wodurch eingangsseitig eine Spannungssteuerung entsteht. Um die Spannungssteuerung des hochohmigen Meßverstärkers zu bewirken, müssen alle Eingangsgrößen auf Spannungen zurückgeführt werden. Im Bild 3 ist dargestellt, wie die Fühler für die elektrischen Größen Strom, Spannung, Widerstand an die Eingangsschaltung angeschlossen werden. Es wurde eine Ausführung der Eingangsschaltung dargestellt, die für den Anschluß an Geräte mit Kompensationskreis geeignet ist. Es gibt zwei Kompensationsprinzipien; die Kompensation nach *Poggendorf* und nach *Lindeck-Rothe*, wovon das erstgenannte Prinzip für elektrisch/mechanische Geräte (Registriergeräte, z. B. Kompensationsbandschreiber) und das letztere für rein elektronische Geräte (Meßumformer) angewendet wird [3].

Im Bild 3 ist eine Brückenausführung für das Lindeck-Rothe-Verfahren dargestellt. Es erfolgt eine Verschiebung des Potentials am Abgriffpunkt des rechten Brückenzweiges über dem Kompensationswiderstand R_K, über den die Ausgangsgröße – hier der eingeprägte Strom – fließt. Es ergibt sich über R_K der Spannungsabfall $U_K = R_K \cdot (I_a + I_2)$ unter der Voraussetzung eines sehr großen Verstärkereingangswiderstandes. Der Strom I_a ist ein direktes Abbild der Meßgröße, und er steigt solange an, bis die Differenzeingangsspannung für den Verstärker Null ist. Es ist damit also möglich, über R_K bei Kenntnis der Eingangsmeßspannung den Bereich des Ausgangsstromes festzulegen, da für den Fall der genauen Messung gilt, daß die Eingangsspannung $U = I_1 \cdot R_F$ gleich der Kompensationsspannung U_K und der Spannung U_4 ist. Außerdem wird der Eingangswiderstand extrem hochohmig, da im Kompensationsfall kein Strom fließt. Damit wird das Auftreten eines Meßfehlers durch Bedämpfung der Eingangsquelle verhindert.

Beim Anschluß von Fühlern mit aktiven elektrischen Ausgangsgrößen (U, I) dient die Eingangsschaltung zum Einstellen des Nullpunktes (Meßbereichsanfang) und zur Realisierung von Zusatzfunktionen. Sie hat also keine Meßfunktion wie bei der Widerstandsmessung. Zusatzfunktionen sind:

- Vergleichsstellentemperaturkompensation
- Thermoelementbruchsicherung
- Korrektur der Fühlerkennlinie (widerstandslinear, temperaturlinear).

Die Nullpunktverschiebung dient gleichzeitig zur Offsetkorrektur des Verstärkers. Die Thermoelementbruchsicherung hat die Aufgabe, den Verstärker beim Auftreten eines Defektes am Thermoelement in die obere oder untere Endstellung auszusteuern, um den Ausfall des Fühlers zu signalisieren.

Bei der Anwendung von Brückenschaltungen zu meßtechnischen Zwecken ist es erforderlich, bei der Widerstandsmessung den Strom in beiden Zweigen der Anordnung konstant zu halten, damit die zu messende physikalische Größe fehlerfrei abgebildet wird. Da die Dimensionierung von Brückenschaltungen wesentlich von den anzuschließenden Fühlern abhängt, wollen wir uns zunächst einen kurzen Überblick über einzusetzende Fühler verschaffen.

msr 6537 (Beitrag wird fortgesetzt)

1. Nationale Konferenz „Automatisierung diskreter industrieller Prozesse" der VR Polen

Vom 5. bis 7. Oktober 1978 fand im Ferienkomplex Kozubnik bei Porabka die o. a. Konferenz statt. Die Veranstaltung wurde vom Institut für Automatik der Technischen Hochschule Gliwice (Dir. Prof. *Kowalowski*) organisiert. Die Konferenz hatte ungefähr 120 Teilnehmer, davon etwa $^1/_3$ aus der Industrie.

Die Vorträge waren in 5 Sektionen eingeteilt:

1. Modellierung (Leitung: Prof. *Kowalowski*, Gliwice) — 7 Vorträge
2. Produktionsterminplanung und Steuerung (Leitung: Prof. *Gorecki*, Krakow) — 16 Vorträge
3. Anwendungen, Ökonomie, Roboter (Leitung: Doz. *Kaczmarcyk*, Warschau)
4. Rechnersteuerung (Leitung: Doz. *Niederlinski*, Gliwice) — 16 Vorträge
5. Theoretische Grundlagen (Leitung: Prof. *Bubnicki*, Wrocław) — 9 Vorträge.

Die Vorträge konzentrierten sich im wesentlichen auf Anwendungen in Stahlwerken, Werkzeugmaschinenzentren, Verformungs- und Montageprozessen im Automobilbau und Hochregallager.

Die Veranstaltung war insgesamt vorzüglich organisiert und wurde durch eine Exkursion in das Kleinwagenwerk Bielsko und einen Film über den Einsatz von Robotern der schwedischen Firma ASEA ergänzt.

Der Nachholebedarf bei der Automatisierung von Stückgutprozessen ist unbestritten. Die Entwicklung einer geschlossenen Theorie ist dadurch behindert, daß es für die Technologie der Stückgutprozesse keine geschlossene Theorie gibt, auf die die Automatisierung aufbauen kann. Unter diesen beiden Aspekten ist die Aktivität der Konferenz ganz besonders hervorzuheben. Die Beiträge dokumentierten deutliche Fortschritte bei der Automatisierung von Stückgutprozessen.

Die Probleme der Roboter sind vor dem Hintergrund zu sehen, daß die polnische Firma MERA PIAP eine Lizenz von ASEA erworben hat.

Alle Beiträge der Konferenz sind in den Wissenschaftlichen Heften „Automatika" der Technischen Hochschule Gliwice (1978) 43—46 veröffentlicht; je 1 Exemplar ist in der Bibliothek der TH Leipzig vorhanden.

Es ist vorgesehen, die Konferenz in einem 2jährigen Rhythmus unter Erweiterung auf internationale Beteiligung weiterzuführen.

msr 6823 *R. Müller*

Automatisierungsgeräte auf der Bukarester Investitionsgütermesse TIB'78

Auf der Bukarester Investitionsgütermesse vom 5. bis 14. Oktober 1978 wurden in beachtenswertem Rahmen Ausrüstungen und komplette Systeme der Automatisierungstechnik ausgestellt.

Neben den Kollektivausstellungen der Außenhandelsunternehmen Mashpriborintorg, KOVO, Metronex, Metrimpex und Elektronum waren auch zahlreiche Hersteller westeuropäischer Länder vertreten. So zeigte die Fa. Honeywell das System TDC 2000, Hartmann & Braun ihre Entwicklung Contronic 3, und die Fa. Siemens offerierte das AMF-Baustein-System in Kombination mit DIGIZET.

Interessante Neu- und Weiterentwicklungen aus dem Gastgeberland waren u. a.

- Explosionsgeschützte Magnetventile des Nationalunternehmens IAMC (Intreprinderes Aparate de Masura si Control Bucuresti-Otopeni) Typ EV-3 Dn 4 und Dn 6 sowie EVc und d, für NW 4 und 6, Schutzart Exe bzw. d. II, BT 4 nach STAS 6877/1-73 (BT 4 entspricht G 4/135 °C), ND max. 6 bar
- Elektropneumatische Magnetventile für Vakuum, entwickelt im Institut für Physik Bukarest, geeignet bis 10^{-6} Torr, NW 25
- Elektronisches Thermistor-Thermometer Typ N 2901, Meßbereich —40 °C ... +200 °C, einstellbar in 4 Stufen zu je 60 K, Meßgenauigkeit ±1,5 K, vorgestellt von ICE (Institutuil de Cercetari si projectari Elektronic Bucuresti).

Vorgestellt wurde auch eine Bedienungsstation für größere Automatisierungsanlagen mit vier Bildschirmeinheiten des Typs PD 1, wovon 2 für schematische und 2 für alphanumerische Darstellungen benutzt werden. Das Ausstellungsobjekt stellte einen Prototyp dar und verdeutlichte, daß auch hier Bemühungen um eine rationelle Gestaltung der zentralen Überwachungseinrichtungen vorhanden sind.

Die beachtliche progressive Entwicklung der Automatisierungsmittelherstellung in der SR Rumänien, präsentiert durch nennenswerte Produktionsprogramme an elektronischen und elektromechanischen Baugruppen und Einrichtungen des Nationalunternehmens FEA (Fabrica de Elemente Automatizari Bucuresti), an verschiedensten Meß- und Regeleinrichtungen des Nationalunternehmens IAMC (Intreprinderes Aparate de Masura si Control Bucuresti — Otopeni) sowie durch die bereits erwähnte Bedienstation und zahlreiche kontaktlose Steuerungs- und Regelungssysteme (Usilog, Seminal, Telerom und Numerom), geht nicht zuletzt auf eine gezielte Lizenzpolitik und gute Koordinierung der Forschung und Entwicklungsarbeit durch die Institute für Automatisierung (IPA), Metrologie (INM) und Physik (CIP) zurück.

msr 6831 *G. Stalloch*

II. Kolloquium „Elektronik — Prüftechnologie"

Der schnelle Fortschritt auf dem Gebiet der Elektronik durch die Entwicklung hochintegrierter Logik bringt neben der dadurch möglichen Verbesserung vieler technischer Lösungen auch neue Probleme mit sich. Lagen in der Elektronikindustrie die Prüfkosten bisher schon in der Größenordnung der Fertigungskosten, so erfordert der Einsatz hochintegrierter Bauelemente neue Prüfverfahren und Diagnosestrategien, um den Prüfaufwand nicht noch weiter ansteigen zu lassen. Diese Umstände machen das große Interesse verständlich, mit dem Vertreter aus Betrieben, wissenschaftlichen Instituten und Lehreinrichtungen das II. Kolloquium am 20. September 1978 in Karl-Marx-Stadt besuchten. Veranstaltet wurde es von der Sektion Informationstechnik der TH Karl-Marx-Stadt gemeinsam mit der Kammer der Technik.

In seinem Eröffnungsvortrag „Der wissenschaftliche Stand der Elektronik — Prüftechnologie bestimmt Qualität und Zuverlässigkeit der Weltmarktprodukte" zeigte Prof. Dr.-Ing. habil. *Bürger*, TH Karl-Marx-Stadt, daß der fortschreitende Integrationsprozeß in der Mikroelektronik zu einer Reihe neuer Problemstellungen für die Prüftechnologie führt. Der Einsatz von Mikroprozessoren auch für Prüfgeräte und Prüfsysteme ermöglicht neue Lösungen, erfordert

aber auch, daß die Prüftechnologie bereits bei der Systemkonzeption berücksichtigt wird. Die automatischen Prüfverfahren mit der Wirkung einer geschlossenen Regelstrecke, bei der die Qualität die Regelgröße darstellt, gewinnen an Bedeutung und müssen nicht nur zu kostengünstigen Lösungen, sondern auch zu einer Entlastung der Werktätigen von ermüdenden Prüfaufgaben führen.

„Die Lokalisierbarkeitsanalyse zur Ermittlung prüftechnischer Ersatzschaltungen“ erläuterte Dipl.-Ing. *Menzel*, VEB Robotron Buchungsmaschinenwerk Karl-Marx-Stadt. Dieses Verfahren gestattet die Darstellung elektronischer Schaltungskomplexe als reduzierte Ersatzschaltungen unter dem Aspekt der Geräteprüfung bzw. Fehlerlokalisierung. Der zu prüfende Schaltungskomplex wird als Blocknetzwerk vorausgesetzt, dessen Verbindungen zwischen den Blöcken als Koeffizienten einer Verbindungsmatrix erfaßbar sind. Durch entsprechende Matrizenoperationen werden die prüftechnisch zu integrierenden Blöcke ermittelt, die dann zur prüftechnischen Ersatzschaltung führen.

„Prüfverfahren für digital arbeitende Geräte“ stellte Doz. Dr.-Ing. *Hübner*, TH Karl-Marx-Stadt, einander gegenüber. Die Plattentechnik ist wegen des hohen Aufwandes und der großen zu verarbeitenden Datenmengen nur im stationären Betrieb anwendbar. Weitere Methoden sind der Vergleich mit Mustergeräten und die Übergangszählung. Eine Weiterentwicklung der Übergangszählung ist die Kennzeichenanalyse. Sie wird noch sehr selten benutzt, obwohl sie entwicklungsfähig ist, auch im Kundendienst eingesetzt werden kann und die Wahrscheinlichkeit der Fehlererkennung wesentlich höher ist als bei der Übergangszählung.

„Die quasidigitale Prüfung analoger Verknüpfungsschaltungen — ein neues Verfahren zur Prüfung elektronischer Schaltungen“ stellte Doz. Dr.-Ing. *Kurz*, IH Dresden, vor. Die bei digitalen Schaltungen gebräuchlichen Prüfverfahren können auch auf analoge Schaltungen angewendet werden, wenn die Pegel der digitalen Prüfsignale den Sättigungspegeln der Transferkennlinie einer analogen Elementarschaltung entsprechen. Bei Einbeziehung des Nullpunktes der Kennlinie ergibt sich eine ternäre Prüfung, bei der im Vergleich zur Prüfung mit binären Signalen die Fehlererkennbarkeit steigt und die Anzahl der Tests geringer wird. Anwendungsmöglichkeiten wurden an Beispielen gezeigt.

„Probleme bei der Prüfung von Mikroprozessoren“ erläuterte Dipl.-Ing. *Goldmann*, Robotron-Forschungszentrum Karl-Marx-Stadt. Die bei der logisch-funktionellen Prüfung einfacher TTL-Gatter noch anwendbare konventionelle Prüftechnik reicht zur Prüfung hochintegrierter Logik nicht mehr aus. Die bei der Prüfung der Schaltkreise U 820D und U 808D gesammelten Erfahrungen wurden dargestellt. Bei allen Mikroprozessoren ist eine automatisierte, rechnergesteuerte Prüfung unumgänglich. Für die Herstellung der Prüfprogramme sind Cross-Assembler und Black-box-Simulationsmodelle wesentliche Hilfsmittel. Die Erzeugung der Sollwerte für die Prüfung ist ebenfalls ohne Rechnerunterstützung nicht möglich.

„Die Bedeutung der Prüftechnologie für die Sicherung der Qualität und Zuverlässigkeit“ zeigte Dipl.-Ing. *Viehweger*, VEB Robotron Buchungsmaschinenwerk Karl-Marx-Stadt. Die Prüftechnologie umfaßt die Gesamtheit der Maßnahmen zum Feststellen der Gebrauchseigenschaften eines technischen Objektes und beinhaltet einen technischen und einen organisatorischen Aspekt. Aus technischen und ökonomischen Gründen müssen oftmals reduzierte Feststellungsverfahren in Form von Stichprobenverfahren angewendet werden, deren Auswirkungen auf Qualität und Zuverlässigkeit stochastischen Charakter tragen.

Neben den Verfahren zur Fehlerdiagnose und der Organisation der Prüfprozesse werden die Prüfkosten auch durch die Einordnung der Prüfprozesse in den Fertigungsablauf bestimmt. In seinem Beitrag „Einordnung von Prüfprozessen in den Fertigungsablauf unter ökonomischen Gesichtspunkten“ stellte Doz. Dr.-Ing. *Schulze*, TH Karl-Marx-Stadt, ein Verfahren vor, mit dem für ausgewählte Fälle ein Kostenvergleich und die Auswahl der kostenoptimalen Variante möglich wird. Die Kosten für jede Prüfstufe und für den Gesamtprozeß werden durch eine stochastische Simulation ermittelt.

Wenn die Ermittlung spezieller Eigenschaften von Werkstoffen oder Funktionseinheiten langwierig, ungenau oder nur zerstörend möglich ist, kann man mit Hilfe von Korrelationsrechnungen die gesuchte Eigenschaft aus bekannten Eigenschaften rechnerisch bestimmen.

In seinem Beitrag „Die Korrelationsmethode für die Beurteilung von Materialien und Funktionseinheiten“ erläuterte Dipl.-Ing. *Skočil*, TH Plzeň, die erwähnte Methode und mit ihr gewonnene Erfahrungen.

„Die Verdrahtungsprüfung mittels Prozeßrechner“ wurde von Dr.-Ing. *Fleischer*, Robotron-Forschungszentrum Karl-Marx-Stadt, als notwendige Voraussetzung für gegen Null gehende Fehlerwahrscheinlichkeiten bei der Herstellung von Baugruppen der Informationsverarbeitung erläutert. Für die Prüfung einer komplexen Baugruppe mit mehr als 5000 verdrahteten Anschlußkontakten wurden die Anwendung eines Prüfautomaten, dessen Hauptbestandteil ein Prozeßrechner 4200 ist, und fünf verschiedene Prüfverfahren gezeigt.

Über die „Berechnung von Testbelegungen für Schaltnetzwerke“ sprachen Dipl.-Ing. *Kühnrich* und Dipl.-Ing. *Benedickt*, TH Karl-Marx-Stadt. Auf der Grundlage der dynamischen Operationen der Booleschen Algebra wurde für den Kleinrechner KRS 4200 ein Programm erarbeitet, das die Testbelegungen für kombinatorische und sequentielle Schaltnetzwerke bezüglich der Fehlerklassen *s-a-o* und *s-a-*1 berechnet. Das Programm und die Arbeit mit ihm wurden erläutert.

Die geführten Diskussionen und eine Reihe von Gesprächen zeigten, daß in den Vorträgen viele Probleme von allgemeinem Interesse angesprochen wurden. Die umfangreichen, noch zu lösenden Aufgaben auf dem Gebiet der Elektronik — Prüftechnologie erfordern einen ständigen Erfahrungsaustausch über theoretische und praktische Ergebnisse.

Das III. Kolloquium „Elektronik — Prüftechnologie“ wird im Herbst 1980 stattfinden.

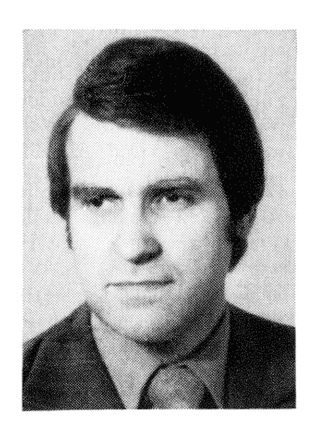
msr 6829 *M. Schulze*

Plovdiver Mustermesse

Die Plovdiver Messe, die vom 3. bis 10. September 1978 stattfand, war sehr auf die landesbedingten Probleme Bulgariens zugeschnitten. Das zeigte sich vor allem in dem Ausstellungsprofil der ausländischen Aussteller, die sich insbesonder an bulgarischen Marktlücken orientierten. Dadurch waren auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik kaum universelle Systemlösungen erkennbar, sondern häufig nur Problemlösungen für die Nahrungsgüterwirtschaft u. dgl. Daß bekannte Firmen deshalb nur einen Teil ihrer Produkte zeigten oder selbst gar nicht auf der Messe erschienen, war dadurch verständlich.

Die Firmen zeigten nur einen kleinen Anteil ihrer Produkte, die nicht in jedem Fall den fortgeschrittenen internationalen Stand darstellten und von den letzten Messen (INTERKAMA '77, Hannover-Messe '78 oder LFM '78) bekannt waren. Einige Exponate sind seit mehr als 5 Jahren bekannt.

msr 6827 *H. Fuchs*



Dr. sc. techn. D. Balzer berufen

Mit Wirkung vom 1. September 1978 berief der Minister für das Hoch- und Fachschulwesen Herrn Dr. sc. techn. *Dietrich Balzer* zum ordentlichen Professor auf den Lehrstuhl für Prozeßrechentechnik an der Sektion Automatisierungsanlagen der TH Leipzig. Diese Berufung kann man als einen Ausdruck des Einrückens einer weiteren Generation von Fachkollegen in die vorderste Reihe der akademischen Lehrer an den Hochschulen unseres Landes sehen – einer neuen Generation in mehrfacher Hinsicht.

Nach üblicher Oberschulausbildung und Absolvierung der ABF in Halle war Dr. *Balzer* ein Jahr als Anlagenfahrer im Chemiekombinat Bitterfeld tätig und studierte anschließend am Leningrader Technologischen Institut Automatisierungstechnik. Der Abschluß mit dem Prädikat „mit Auszeichnung" war Anlaß für die Aufnahme einer Aspirantur an der gleichen Einrichtung, die Dr. *Balzer* mit einer Doktordissertation über die Steuerung von Systemen mit verteilten Parametern abschloß.

Diese Dissertationsschrift behandelte bereits Probleme seines späteren Einsatzbetriebes, des VEB Petrolchemisches Kombinat in Schwedt. Dort war Dr. *Balzer* von 1969 bis 1975 erst Gruppen- und später Hauptabteilungsleiter sowie stellvertretender Direktor des Automatisierungs- und Rechenzentrums. Die hier von Dr. *Balzer* zu lösenden Aufgaben waren von hoher Komplexität, die er durch eigene tiefgründige wissenschaftliche Arbeit, durch interdisziplinäre Zusammenarbeit und durch wissenschaftliche Kontakte mit ausländischen Fachkollegen, vor allem in der UdSSR, hervorragend gemeistert hat. Diese schöpferische Tätigkeit findet ihren Niederschlag auch in einer großen Anzahl von Veröffentlichungen, Patenten, Vorträgen im In- und Ausland und in vielen von ihm angeregten und betreuten Qualifizierungsarbeiten. Viele Fachkollegen in Theorie und Praxis kennen ihn als den langjährigen Vorsitzenden des Fachausschusses „Prozeßrechentechnik" und als Mitglied des Vorstandes der wissenschaftlichen Sektion Automatisierungstechnik im Fachverband Chemische Technik der KDT.

Seine Berufung zum Hochschuldozenten für Prozeßrechentechnik 1975 an die damalige Ingenieurhochschule Leipzig erweiterten den Wirkungsbereich von Dr. *Balzer* auf die Ausbildung und Erziehung junger Ingenieurkader, die ihrerseits sein Wissen und Können, seine Praxis und internationalen Kontakte hoch schätzen. Diese seine vielseitige Arbeit hat mit zur Formierung des wissenschaftlichen Profils der Einrichtung beigetragen, die 1977 in die Technische Hochschule überging und deren Sektion Automatisierungsanlagen, an der Prof. *Balzer* wirkt, ihr anlagenbezogenes Lehr- und Forschungsprofil zielstrebig weiter ausbaut.

In seiner Dissertation (B) „Automatische Steuerung verfahrenstechnischer Systeme" hat Prof. *Balzer* in systematischer, zusammenfassender und verallgemeinernder Darstellung die neuesten Erkenntnisse zur automatischen Steuerung verfahrenstechnischer Systeme vorgelegt. Diese Arbeit verbindet hohe Allgemeingültigkeit mit unmittelbarer Praxiswirksamkeit und ist in dieser Art als Spitzenleistung eingeschätzt worden.

In Fortführung aller dieser bemerkenswerten Erfolge ist Prof. *Balzer* zu wünschen, daß er seine wissenschaftliche und erzieherische Tätigkeit weiter mit der von ihm gewohnten Vitalität wahrnehmen kann. Die besten Wünsche aller Fachkollegen und der Redaktion „msr" sind dabei auf seiner Seite.

msr 6822 *W. Richter*

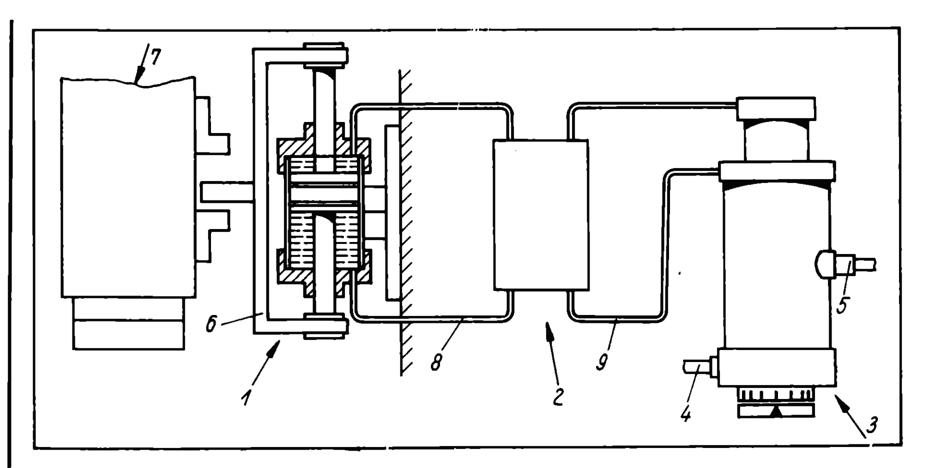
msr PATENTREFERATE

Steuervorrichtung zur Geschwindigkeitsregelung von Arbeitskolben

DDR-AP 130068, Klasse F 15 B, Gruppe 11/02, 14 Anspruchspunkte, 11 Zeichnungen, Anmeldung: 3. Juni 1977, Ausgabe: 1. März 1978, Inhaber: Transform Verstärkungsmaschinen AG (BRD), Priorität: BRD, 3. Juni 1976.

Die Erfindung betrifft die Geschwindigkeitsregelung von pneumatischen und/ oder hydraulischen Arbeitskolben und damit angetriebenen Maschinenteilen wie beispielsweise an Pressen. Durch die Erfindung läßt sich der Arbeitsablauf des Maschinenteils auch bei hohen Arbeitsgeschwindigkeiten und kleinen Arbeitswegen zeit- und wegeabhängig mit hoher Präzision steuern.

Die schematisch dargestellte Erfindung ist im wesentlichen aus einem als Antriebszylinder *1* des Systems zu verste-



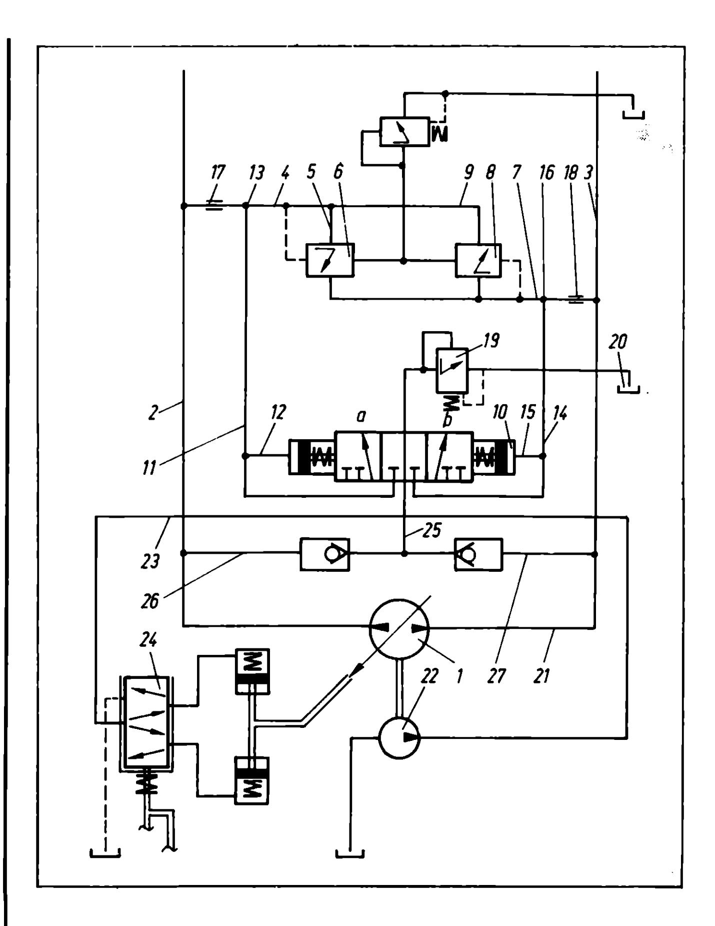
1 Antriebszylinder, *2* Flüssigkeits- und Druckübersetzer, *3* Drosselanordnung, *4* Eingang, *5* Ausgang, *6* Bügel, *7* Maschinenelement, *8*; *9* Hydraulikkreise

henden Hydraulikkolben, einem Flüssigkeitsmengen- und Druckübersetzer *2* und einer Drosselanordnung *3* aufgebaut, die mit ihrem Eingang *4* und ihrem Ausgang *5* in eine nicht dargestellte Hydraulikanlage für die Betätigung eines Maschinenelementes, beispielsweise einer Presse, eines Schnittgeräts oder auch eines Baggergreifers u. a. eingeschaltet ist. Dabei kann die Drosselanordnung entweder in die eigentliche Kraft-Antriebsseite der Hydraulikanlage oder aber, beispielsweise bei hydro-pneumatischer Arbeitsweise, in die Gegensteuerungsseite dieser Hydraulikanlage bzw. deren Arbeitskolben eingebaut sein.
Der Antriebszylinder *1* greift mit einem Bügel *6* die Bewegungsstellung des in seiner Bewegung programmgemäß zu steuernden Maschinenelements *7* (z. B. der Arbeitsstößel einer Presse) entweder voll kraftschlüssig oder, wie dargestellt, mit einem Arbeitsspiel ab und übersetzt die Bewegung in den Fluß eines die Steuerung antreibenden Hydraulikkreises *8*. Über den Flüssigkeitsmengen- und Druckübersetzer *2* wird dann über einen zweiten angetriebenen Hydraulikkreis *9* die eigentliche Drosselanordnung *3* betätigt. Unabhängig von dem Einbau in die beschriebene Drosseleinrichtung arbeitet der Flüssigkeitsmengen- und Druckübersetzer *2* als Anpassungselement zwischen einem antreibenden *8* und einem angetriebenen *9* Hydraulikkreis. Im umgekehrten Einbau kann der Flüssigkeitsmengen- und Druckübersetzer *2* auch als Untersetzer mit einem entsprechenden Untersetzungsverhältnis arbeiten. Weitere Ausführungsformen und Einzelheiten gehen aus der Patentschrift hervor. msr 6814

Hydraulisches Getriebe

DDR-WP 127566, Klasse F 16 H, Gruppe 39/44, 4 Anspruchspunkte, 2 Zeichnungen, Inhaber: Dipl.-Ing. *Achim Müller*, Dipl.-Ing. *Bernd Prüfer*, Dipl.-Ing. *Klaus Zimmerling* und Dipl.-Ing. *Günter Schade*, Anmeldung: 26. August 1976, Ausgabe: 5. Oktober 1977.

Aufgabe der Erfindung ist es, in hydraulischen Getrieben die Umwandlung nicht verbrauchter Leistung in Wärme durch Einschwenken einer den Kreislauf speisenden regelbaren Pumpe stark zu reduzieren, ohne besondere Einrichtungen, wie z. B. eine Nullhubregeleinrichtung, hierfür installieren zu müssen.
Eine regelbare hydrostatische Pumpe *1* eines hydraulischen Getriebes mit geschlossenem Kreislauf, angetrieben von einem nicht dargestellten Antriebsaggregat, ist über Leitungen *2*; *3* mit einem ebenfalls nicht dargestellten Hydromotor verbunden. Von der Leitung *2* führt eine Verbindung über Leitungen *4*; *5*, ein Druckbegrenzungsventil *6* und eine Leitung *7* zur Leitung *3*. Von der Leitung *3* führt eine Verbindung über die Leitung *7*, ein Druckbegrenzungsventil *8*, Leitungen *9*; *4* zur Leitung *2*. Ein Spülventil *10* ist über Leitungen *11*; *12* und einem Abzweig *13* mit der Leitung *4* und über Leitungen *14*; *15* und einem Abzweig *16* mit der Leitung *7* verbunden.
Zwischen der Leitung *2* und dem Abzweig *13* ist die Leitung *4* als Drosselstrecke *17* und zwischen der Leitung *3* und dem Abzweig *16* ist die Leitung *7* als Drosselstrecke *18* ausgebildet. Ein Druckbegrenzungsventil *19* ist zwischen dem Spülventil *10* und einem Behälter *20* angeordnet. Von dem Spülventil *10* führen weitere Verbindungen über eine Leitung *21* zu einer Speisepumpe *22*, über eine Leitung *23* zu einer Steuereinrichtung *24*, vorzugsweise einer Servo-Stelleinrichtung der regelbaren hydrostatischen Pumpe *1* und über Leitungen *25*; *26* zur Leitung *2* bzw. *25*; *27* zur Leitung *3*.
Im Normalbetrieb fließt der Ölstrom von der regelbaren hydrostatischen Pumpe *1* über die Leitung *2* zu dem nicht dargestellten Verbraucher und von da über Leitung *3* zur Pumpe *1* zurück. Das von der Speisepumpe *22* geförderte Öl gelangt über die Leitungen *21*; *23* zur Steuereinrichtung *24* und über die Leitungen *25*; *27* in die Niederdruck führende Leitung *3*. Über den in Mittelstellung stehenden Spülschieber *10* bestimmt das Druckbegrenzungsventil *19* den Einspeisedruck. Der in der Leitung *2* anliegende Hochdruck beaufschlagt über die Leitungen *4*; *11*; *12* den Spülschieber *10* und bringt ihn in die Schaltstellung „a“. Übersteigt der in der Leitung *2* anliegende Druck die Einstellung des Druckbegrenzungsventiles *6*, fließt das unter Hochdruck stehende Öl über die Leitungen *4*; *5*, das Druckbegrenzungsventil *6* und die Leitung *7* zum Abzweig *16*. Mit steigendem Widerstand in der Drosselstrecke *18* fließt die größere Menge des vorgenannten Ölstromes über die Leitung *14*, den Spülschieber *10* und das Druckbegrenzungsventil *19* in den drucklosen Behälter *20*. Die infolgedessen über die Drosselstrecke *18* in die Leitung *3* fließende geringere Ölmenge fehlt an der Pumpe *1*. Der Druck in der Leitung *3* fällt und damit über die Leitungen *27*; *25*; *21* an der Speisepumpe *22* sowie über die Leitungen *27*; *25*; *23* an der Steuereinrichtung *24*. Die Pumpe *1* schwenkt auf kleineren Schwenkwinkel ein. Arbeitet die Pumpe *1* in umgekehrter Förderrichtung, bewirkt die Drosselstrecke *17* den gleichen Effekt. msr 6711



1 hydrostatische Pumpe; 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 12, 14, 15, 21, 23, 25, 26, 27 Leitungen; 6, 8, 19 Druckbegrenzungsventile; 10 Spülventil; 13, 16 Abzweige; 17, 18 Drosselstrecke; 20 Behälter; 22 Speisepumpe; 24 Steuereinrichtung

Einrichtung zur Steuerung der Klemmzylinder von Profilumformmaschinen

DDR-WP 128667, Klasse B 21 D, Gruppe 7/06, 3 Anspruchspunkte, 1 Zeichnung, Inhaber: *Dietrich Labs*. Anmeldung: 18. Oktober 1976, Ausgabe: 30. November 1977.

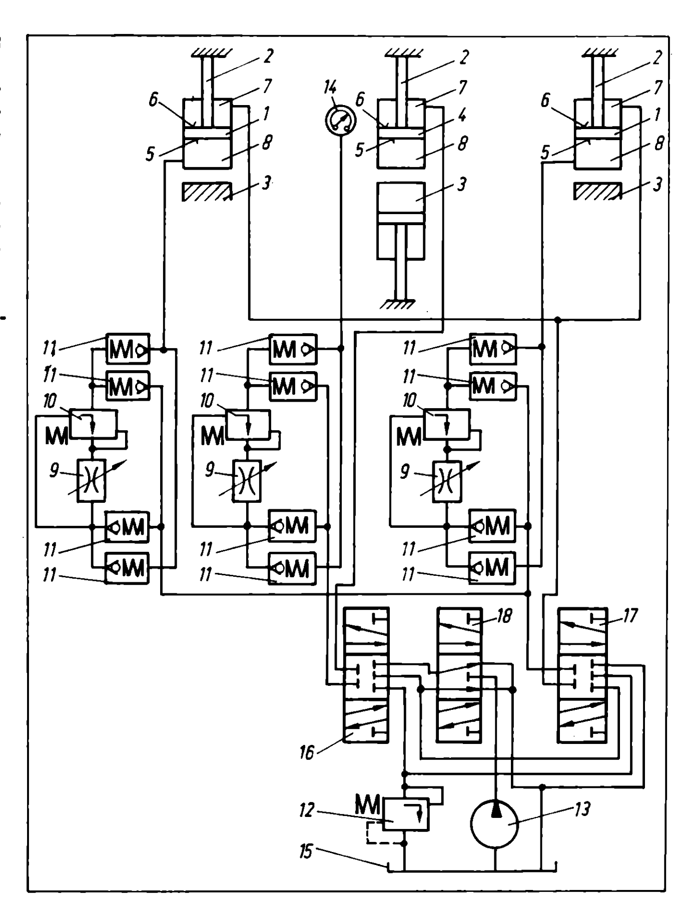
Die Erfindung betrifft eine Einrichtung zur Steuerung der Klemmzylinder von Profilumformmaschinen mit drei parallel nebeneinander stehenden Klemmzylindern und einer beweglichen unteren

Tischauflage. Durch die Einrichtung wird die Steuerung der drei parallel nebeneinander stehenden Klemmzylinder, die das über die x-Achse zu verformende Profil halten und führen, optimiert und gleichzeitig eine Verformungsmöglichkeit quer zur Biegerichtung zum Profilrichten über die y-Achse geschaffen. Bei einem Flächenverhältnis der Kolbenseite zur Kolbenstangenseite der drei Klemmzylinder von 2:1 wird über eine Verkettung mit Hilfe von drei Wegeventilen zum Druckstromerzeuger und eine Fluidführung zum Kolbenraum der Klemmzylinder über eine Drossel mit einem Differenzdruckventil, die über Graetz-geschaltete Rückschlagventile angeschlossen werden, für das Schließen der Klemmzylinder eine Zulaufstrom- und für das Öffnen eine Ablaufstrombegrenzung ermöglicht. Dadurch kann durch einen Druckschalter beim Aufsetzen der Klemmzylinder die Umschaltung auf optimalen Klemmdruck erfolgen.

Einzelheiten gehen aus der Patentschrift hervor.

msr 6713

1,4 Klemmzylinder; 2 Kolbenstangen; 3 Tischauflagen; 5 Kolbenfläche; 6 Ringkolbenfläche; 7 Ringkolbenseite; 8 Kolbenseite; 9 Drosselventil; 10, 12 Druckdifferenzventile; 11 Rückschlagventile; 13 Hydraulikpumpe; 14 Druckschalter; 15 Ölbehälter; 16, 17 Wegeventile



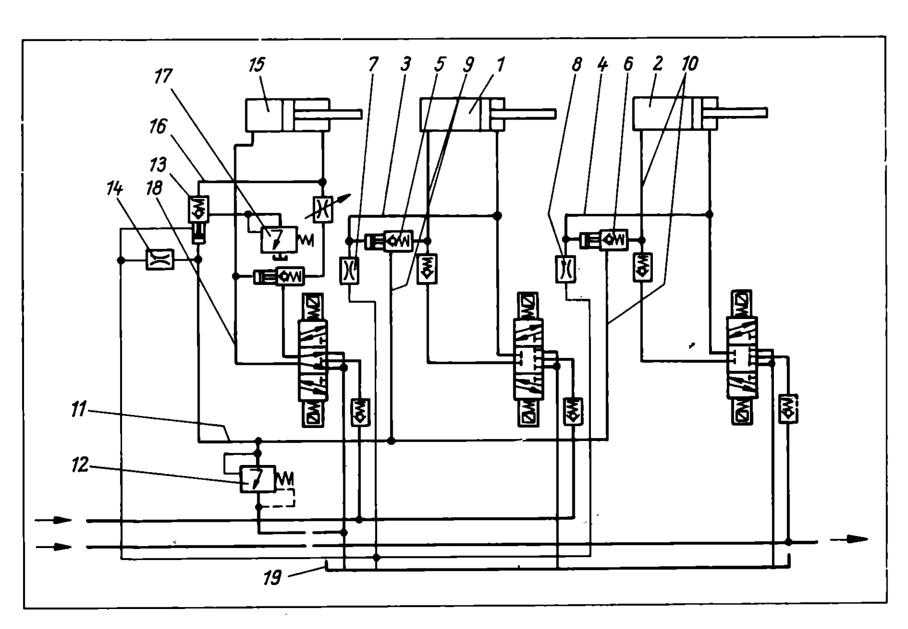
Steuerung hydraulischer Arbeitszylinder an Maschinen zur Herstellung von Betonelementen

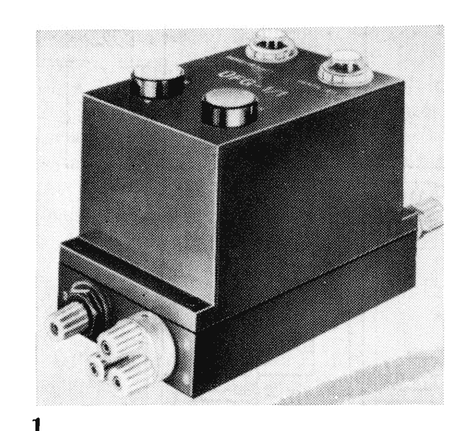
DDR-WP 128561, Klasse B 28 B, Gruppe 17/00, 1 Anspruch, 2 Zeichnungen. Inhaber: *Karl-Heinz Liebold, Joachim Grau.* Anmeldung: 29. November 1976, Ausgabe: 23. November 1977.

Die Erfindung betrifft die Steuerung hydraulischer Arbeitszylinder an Maschinen zur Herstellung von Betonelementen, insbesondere Hohldielen, bei der beim Einziehen der Holzpaletten zwischen Form und Absenktisch auftretende Höhenunterschiede zwischen der Holzpalette und der ausfahrenden Rüttelbohle ausgeglichen werden. Das Ziel der Erfindung besteht in der Schaffung einer störungsfrei arbeitenden Steuerung, die mit geringem technischen Aufwand und ohne Flüssigkeitsspeicher keine besonderen Bedingungen an die Pflege und Wartung der Anlage stellt, sowie Ausschuß, Ausfall- und Stillstandszeiten senkt. Dies wird erfindungsgemäß dadurch erreicht, daß in zu den kolbenstangenseitigen Räumen der parallelgeschalteten Arbeitszylinder *1*; *2* führenden Steuerleitungen *3*; *4* entsperrbare Rückschlagventile *5*; *6* und Konstantdrosseln *7*; *8* angeordnet sind und die kolbenbodenseitigen Räume über Steuerleitungen *9*; *10*; *11* mit einem Druckbegrenzungsventil *12*, einem Rückschlagventil *13* und einer in Bypass geschalteten Konstantdrossel *14* geringen Durchflußquerschnitts verbunden sind, wobei der kolbenstangenseitige Raum des Arbeitszylinders *15* für den Absenktisch einerseits durch eine Steuerleitung *16* über ein Rückschlagventil *13* und ein Druckbegrenzungsventil *17* und andererseits über eine Zylinderleitung *18* und ein Druckbegrenzungsventil *12* zum Flüssigkeitsbehälter *19* führt. Einzelheiten gehen aus der Patentschrift hervor.

msr 6760

***1, 2, 15* Arbeitszylinder; *3, 4, 9, 10, 11, 16* Steuerleitungen; *5, 6, 13* Rückschlagventile; *7, 8, 14* Konstantdrosseln; *12, 17* Druckbegrenzungsventile; *18* Zylinderleitung; *19* Flüssigkeitsbehälter**





1

Überfüllsicherung ÜFG-1/1

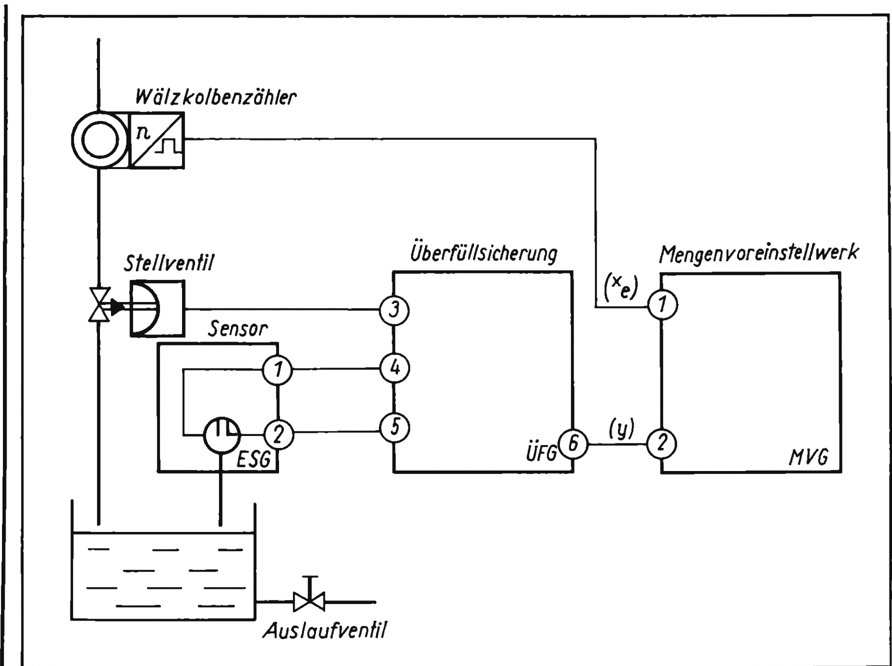
Die Überfüllsicherung ÜFG (Bild 1) dient der Überwachung von Maximalfüllständen in drucklosen Behältern, insbesondere auch Kesselwagen, und kann außerdem zur Dosierung von Flüssigkeiten und evtl. Schüttgütern eingesetzt werden. In Verbindung mit anderen Dosiereinrichtungen bzw. Steuerungen trägt die ÜFG zur Erhöhung der Sicherheit des Dosiervorganges bei (Bild 2). Sie läßt sich am Gerät bzw. durch externe Signale ein- bzw. ausschalten. Durch Verwendung eines Sensors mit Ejektorwirkung (Bild 3-ESG-1/1 bis ESG-1/3) wird die ÜFG bei einem möglichen Leitungsbruch stillgesetzt und kann erst nach Reparatur wieder in Betrieb genommen werden.
Die Überfüllsicherung enthält einen Grenzwertbaustein, der das analoge Unterdrucksignal des Meßgliedes (Sensor) in ein binäres Normaldrucksignal wandelt, einen Speicher zur Aufrechterhaltung der Ausgangsinformation und einen Verstärker für die Stellgliedansteuerung.

Technische Daten
Überfüllsicherung ÜFG-1/1

Hilfsluftdruck p_H	140 kPa(Ü) ± 10%
zulässige Umgebungstemperatur	(−10 ... +50) °C
Schutzgrad	IP 41
Luftverbrauch	≦ 400 dm³ i. N./h.
Abmessungen	ESG-Aufbaugehäuse A2 210 mm × 100 mm × 135 mm
Masse	1,2 kg
Typ-Nr.:	2.4016/00:08

Ejektorsensor ESG-1/1 bis ESG-1/3
Der Ejektorsensor wird in einer Armatur mit folgenden Daten geliefert:

Rohrmaterial	X 10 CrNi; 18.9
Kopf der Armatur	Miramid
Sensoreinsatz	(Meß-, PVC oder PTFE-Glied)
Zubehör	verstellbare Verschraubung M 27 × × 2 oder verstellbarer Flansch



2

3

ESG-1/1, Typ-Nr.: 2.4018/01:05, Länge: 250 mm

ESG-1/2, Typ-Nr.: 2.4018/02:01, Länge: 500 mm

ESG-1/3, Typ-Nr.: 2.4018/03:08, Länge: 1000 mm

Hersteller: VEB Reglerwerk Dresden, 806 Dresden, PSF 380. msr 6788.1

Dosierpumpensteuerung

Die Dosierpumpensteuerung DPG-1/2 kann in Verbindung mit geeigneten Dosierpumpen (z. B. RWD-Einbau-Dosierpumpe Typ 01.200006:08) folgende Aufgaben erfüllen (Bild 4):

1. Pulsierender, über die Zeit konstanter Kleinmengen zu größeren Stoffströmen.
2. Dosieren von Teilmengen ($n = 1 ... 666666$), z. B. Abfüllen mit sehr konstantem Wiederholungswert.
3. Ein- oder mehrstufiges Mischen zweier oder mehrerer Komponenten bei frei wählbarem Mischungsverhältnis, z. B. Herstellen von Labormischungen oder Mischen über längere Zeiträume in industriellen Anlagen.

Technische Daten
(bei Kombination mit o. g. Einbau-Dosierpumpen)

Hilfsluftdruck p_H	140 kPa (Ü) ± 10%
Schutzgrad	IP 20
Ex-Schutzgrad	100% (vollständig pneumatisch)
zulässige Umgebungstemperatur	+5 °C ... +40 °C
Abmessungen	EGS-Kastengehäuse A
a) Steuerung	480 mm × 160 mm × 300 mm
b) eine Pumpe	275 mm × 135 mm × 60 mm

Fördermedien	Flüssigkeiten (Grenzzähigkeit 5 cPa bzw. 5 mPa · s) Gase
Anzahl der gleichzeitig ansteuerbaren Pumpen	1 ... 6
Hubvolumen je Pumpe	0,4 cm³ ... 4 cm³
Steuerfrequenz	umschaltbar 1 Hz/0,5 Hz (≙ 1 Hub bzw. 0,5 Hub je s)

Typ-Nr.: 9.01 3000:05

Hersteller: VEB Reglerwerk Dresden, 806 Dresden, PSF 380. msr 6788.3

Mengendosiergeräte

Die Mengendosiergeräte MDG-1/2, -2/1 und -2/2 erzeugen Druckimpulse, die in ihren Parametern Druck und Impulsbreite einstellbar sind. Diese Druckimpulse werden einer externen Dosiereinrichtung (Pipette, Dosierkolben o. a. – gehören nicht zum Lieferumfang) zugeleitet und dienen so zum Dosieren von Flüssigkeiten unterschiedlicher Viskosität. Um bei Flüssigkeiten bestimmter Viskositäten ein Nachlaufen des Mediums zu verhindern, kann bei den Gerätevarianten –1/2 und –2/2 in den Dosierpausen ein Vakuum aufgeschaltet werden (Bild 5).
Anwendung finden die MDG zum Beispiel
- beim Klebebonden von Chips der elektronischen Industrie (Dosieren von Klebertröpfchen)
- beim Dosieren von Flüssigkeiten in der Arzneimittelindustrie.

Technische Daten

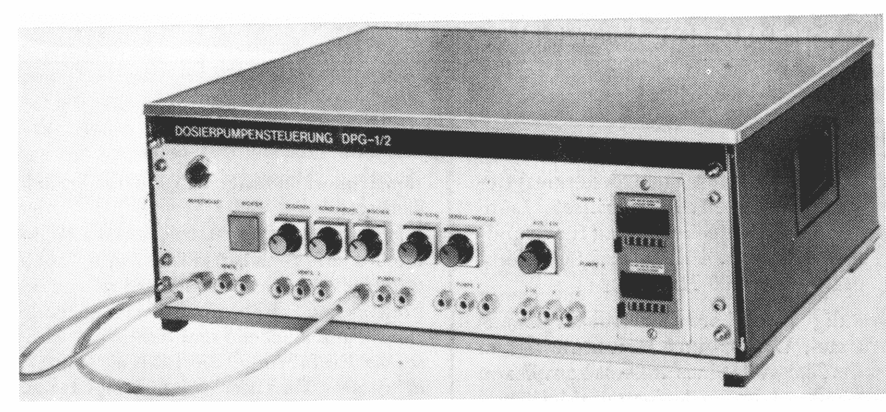
Hilfsluftdruck p_H	140 kPa(Ü) ± 10%
Vordruck für Dosierdruck p_v	(400 ... 600) kPa (Ü)
Einstellbereich des Dosierdruckes p_{dos}	(10 ... 350) kPa (Ü)
Schutzgrad	IP 20
Ex-Schutz MDG-2/1, -2/2	100% (Vollständig pneumatisch)
MDG-1/2	kein Ex-Schutz
zul. Umgebungstemperatur	+5 °C ... +40 °C
Abmessungen	EGS-Kastengehäuse A 480 mm × × 120 mm × × 240 mm (Nennmaß)
Einstellbereich der Dosierzeit	0,5 ... 10 s

MDG-1/2 Typ-Nr. 2.4003/01:07
- Ferneingaben elektrisch
- mit externer Vakuumaufschaltung

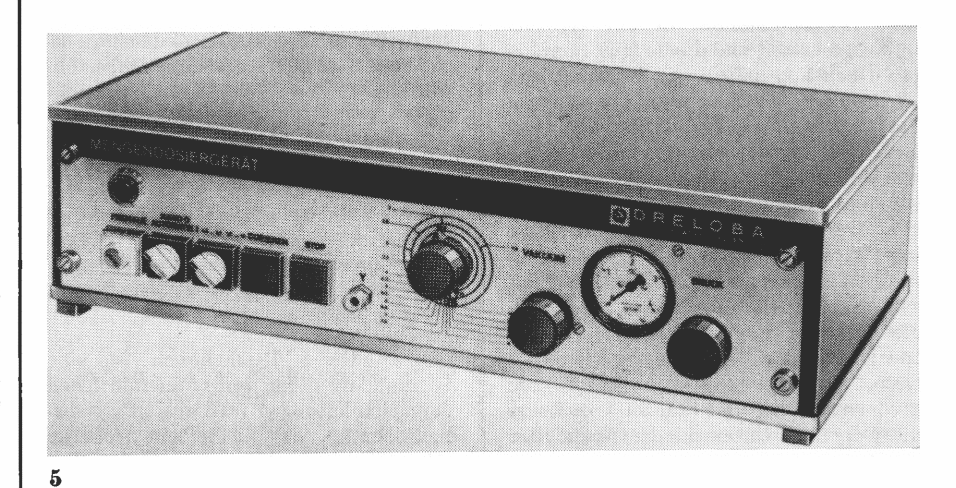
MDG-2/1 Typ-Nr. 2.4003/02:03
- Fereingaben pneumatisch
- ohne Vakuumaufschaltung

MDG-2/2 Typ-Nr. 2.4003/03:18
- Ferneingaben pneumatisch
- mit externer Vakuumaufschaltung

Hersteller: VEB Reglerwerk Dresden, 806 Dresden, PSF 380. msr 6788.4



4



5

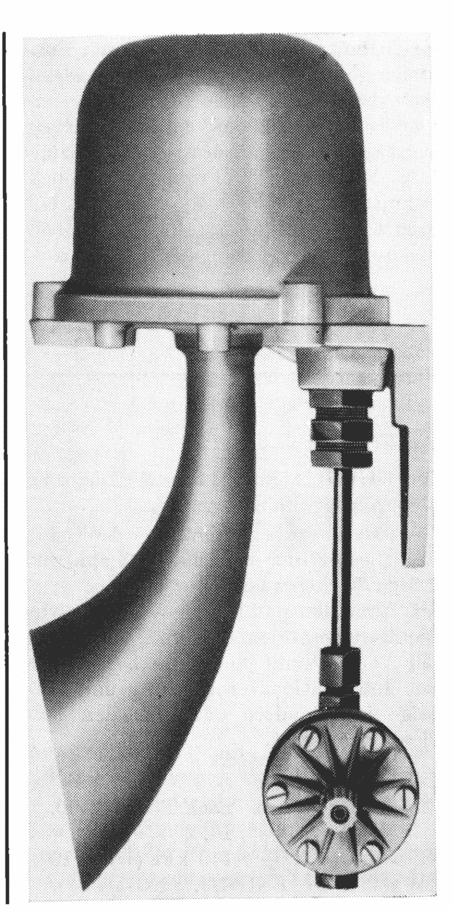
DRELOBA-Steuergeräte

Die Steuergeräte vom Typ GWG-1/1, FNG-1/3, FNG-1/4 (Bild 6) und HPG-1/1, HPG-1/2 sind zum Aufbau kompletter Signal- und Alarmsteuerungen vorgesehen.
Dabei übernimmt die Grenzwertsignaleinheit GWG-1/1 die Erfassung und Signalisierung der Sollwertabweichungen (von fest einstellbaren Sollwerten) analoger Signale im Einheitssignalbereich von 20 bis 100 kPa (Ü).
Die Signaleinheit FNG-1/3 signalisiert bzw. alarmiert die Grenzwerte nach dem Prinzip der Fehlerneuwertsignalisierung.
Die Signaleinheit FNG-1/4 realisiert die optische Gruppensignalisierung und liefert eine Ausgangsinformation zur Ansteuerung der pneumatischen Hupe

Fortsetzung auf Seite 114 unten

6 7 ▶





Prozeßführung von Elektroenergiesystemen. Von *I. M. Markowitsch*. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 464 Seiten, 89 Bilder, 9 Tafeln, 75,00 Mark.

Ständig verfügbare Elektroenergie aus Wärme-, Wasser- und Kernkraftwerken ist die Zielgröße eines äußerst komplexen Systems, an dessen Aufbau und Führung Techniker verschiedener Fachgebiete beteiligt sind. Die umfangreichen Erfahrungen von Prof. Dr. *I. M. Markowitsch* als Lastverteiler, Energiewirtschaftler und Hochschullehrer in der Sowjetunion gestatten einen sehr gut fundierten Überblick zur „Prozeßführung von Elektroenergiesystemen", wobei dem Titel entsprechend die Belange von Generator bis Netz dominieren, aber die Anschlußbedingungen von Dampferzeuger und -turbine sowie Wasserturbine eingeordnet sind. Der Stoff ist gegliedert in Charakterisierung, Betriebsführung und Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen, Qualität der elektrischen Energie und ihre Regelung, Betriebszuverlässigkeit, Stabilität, Netzverbundbetrieb, theoretische Grundlagen zur Stromverteilung und Stabilität in Energiesystemen. Unterschiede zu in der DDR gültigen Bestimmungen sind vermerkt.

Die Überschrift umfaßt neben der energiewirtschaftlichen Konzipierung und dem Normalbetrieb die Beherrschung von Übergangsvorgängen und Störungen. Umfassend behandelt werden Entstehung und Auswertung von Systemhavarien, Stabilitätsstörungen, Störungen in Fernleitungen, Automatisierung von Steuerungen sowie analoge und digitale Modelle. Die Probleme an den Schnittstellen Mensch-System, z. B. begrenzte Informationsaufnahme, Registrierung von Störungsabläufen, Schadensfrüherkennung, sind nicht berücksichtigt.

Die Darstellung ist nicht die eines Handbuches mit in Diagrammen und Tafeln aufbereitetem Stoff, sondern eine von der praktischen Motivierung ausgehende, flüssig geschriebene und damit gut übersetzte Einführung. Sie füllt eine Lücke in unserer Fachliteratur und eignet sich für eine Gesamtsicht der Aufgaben aller an der Elektroenergiebereitstellung gegenwärtig und künftig beteiligten Ingenieure. Die vielfältigen verbalen und formelmäßigen Aussagen wären besser verfügbar, wenn für die deutsche Ausgabe ein Sachwortverzeichnis aufgestellt würde.

B 1214 *E. Kaiser*

Meßtechnisches Praktikum (Für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker). Herausgegeben von *F. Mesch*. Mannheim/Wien/Zürich: Bibliographisches Institut AG. 210 Seiten, zahlr. Bilder.

Das handliche Taschenbuch ist eine Aneinanderreihung von 11 ausführlichen Versuchanleitungen im Fach „Betriebsmeßtechnik", das aus einem früheren „Maschinenlaboratorium" an der Universität Karlsruhe hervorgegangen ist. Ein einleitender Abschnitt ist den Grundlagen gewidmet (eine klare Einführung in die Fehlerrechnung; Meßprinzipien). In den weiteren Abschnitten werden folgende Praktikumsversuche behandelt: Drehzahlmessung; Druck- und Spannungsmessung; Messen von Kräften, Drehmomenten und Leistungen; Durchflußmessung mit Drosselgeräten und Schwebekörpern; Temperaturmessung; Bestimmung des Brennwertes und des Heizwertes von Brennstoffen; Messung der Zähigkeit von Flüssigkeiten; Technische Gasanalyse; Auswuchten rotationssymmetrischer Körper; Schallmessung. Der Rahmen ist also ziemlich weit gespannt und liegt bereits in zweiter Auflage vor. Jede Versuchsanleitung enthält zunächst knappe, aber informative allgemeine Darlegungen zu den Meßgrößen und Meßverfahren und beschreibt dann die entsprechenden Praktikumsaufbauten und Versuchsaufgabenstellungen. Erwähnenswert erscheint, daß der Leser über gute elektrotechnische Kenntnisse und typische Denkweisen, z. B. im Spektralbereich, verfügen muß. Hervorzuheben ist auch die durchgängige Verwendung der Einheiten des SI sowie die Angabe neuester Literatur.

B 1149 *G. Brack*

Automatisierung der operativen Steuerung von Maschinenbaubetrieben. Von *V. M. Portugal* und *A. L. Margolin*. Moskau: Statistika. 166 Seiten, 15 Bilder, 15 Tafeln.

Auf dem Gebiet der Entwicklung automatisierter Steuerungssysteme von Betrieben sind die Arbeiten zur Entwicklung einer Theorie und Methodologie der Projektierung sowie der Funktionsweise derartiger Systeme nach Auffassung der Autoren weitgehend abgeschlossen. In großem Umfang werden gegenwärtig automatisierte Steuerungssysteme entwickelt und in Betrieb genommen. In dieser Situation ist es offensichtlich günstig, die Erfahrung und Arbeitsweise von Betrieben kennenzulernen, die mit diesen automatisierten Systemen bereits einige Zeit ausgerüstet sind. Ein derartiger Betrieb ist der Moskauer Maschinenbaubetrieb „Roter Proletarier", in dem die Arbeiten zur Entwicklung eines automatisierten Steuerungssystems bereits 1964 begannen. Neben dem Teilsystem der Steuerung der Hauptproduktion des Betriebes, das im vorliegenden Buch vorgestellt werden soll, arbeiten noch weitere Teilsysteme, wie z. B. zur materiell-technischen Versorgung, technischen Produktionsvorbereitung, zur Absatz- und Finanzplanung. Anliegen der Autoren ist es, die gesammelten Erfahrungen bei der Entwicklung des Teilsystems der Produktionssteuerung sowie dessen Arbeitsweise darzustellen. Dabei treten selbstverständlich die konkreten Lösungssätze in den Hintergrund. Behandelt werden die informationelle Basis des Systems, insbesondere die Entwicklung einer Normativbasis sowie die Prozeduren der Informationsverarbeitung zur Realisierung der technisch-ökonomischen Planung, die Steuerung von Groß- bzw. Kleinserienproduktion sowie die Organisation der betrieblichen Kontrolle und Regelung.

B 1140 *J.-A. Müller*

Fortsetzung von Seite 113

HPG-1/1, -1/2 (Bild 7) für die akustische Gruppensignalisierung.

Die Grenzwertsignaleinheit GWG-1/1 und die Signaleinheit FNG-1/3 sind für 6 Signalstellen ausgelegt.

Die Einheiten sind für die Warteninstrumentierung vorgesehen und auf Grund der Verwendung pneumatischer Geräte zur Informationsverarbeitung und Anzeige insbesondere auch für den Ex-Bereich geeignet.

Technische Daten

Nennbedingungen	nach TGL 2.2500, Bl. 2
Hilfsluftdruck p_H	140 kPa (Ü) ± 10%
für GWG-1/1, FNG-1/3, FNG-1/4	
für HPG-1/1, -1/2	(250 ... 630 kPa (Ü)
Abmessungen	
für GWG-1/1, FNG-1/3, FNG-1/4	80 mm × 160 mm × 485 mm
für HPG-1/1, -1/2	165 mm × 230 mm × 165 mm

Grenzwertsignaleinheit
GWG-1/1, Typ-Nr.: 2.4006/05: 09
Signaleinheit
FNG-1/3, Typ-Nr.: 2.4006/04: 02
Signaleinheit
FNG-1/4, Typ-Nr. 2.4006/03: 06
Pneumatische Hupe
HPG-1/1, Typ-Nr.: 2.4000/05: 06
HPG-1/2, Typ-Nr.: 2.4000/01: 00

Hersteller: VEB Reglerwerk Dresden, 806 Dresden, PSF 380. msr 6788.5

Der Mensch im Regelkreis. Von *G. Johannsen, H. E. Boller, E. Donges* und *W. Stein.* München/Wien: R. Oldenbourg Verlag. 259 Seiten, 60 Bilder, 5 Tafeln.

Untersuchungen über das Regelverhalten des Menschen in einem Mensch-Maschine-System sind notwendig, um durch Anpassung der dynamischen Eigenschaften einer Regelstrecke an die Fähigkeiten und Fertigkeiten des Menschen das Gesamtsystem optimumnah entwerfen zu können. Mit Hilfe systemtheoretischer Beschreibungsmodelle kann eine solche Darstellung menschlicher Verhaltenskomponenten in der „Sprache" der Regelungstechnik gewonnen werden.

In dem Buch werden der sog. quasilineare und der optimaltheoretische Ansatz erläutert. Diesen beiden Hauptteilen ist eine Charakteristik von Mensch-Maschine-Systemen und ihre systemtheoretische Darstellung vorangestellt, der Anhang enthält regelungstheoretische Grundlagen des optimaltheoretischen Ansatzes. Sachwortregister, Literaturverzeichnis und eine Übersicht über die verwendeten Symbole ergänzen die drucktechnisch sehr ansprechende und gut gestaltete Broschüre. Allerdings sind zwei Sachverhalte bei der Bewertung des Buches zu beachten: Zunächst verweist das Buch nur auf angelsächsische und deutschsprachige Literatur und, was dem Rezensenten problematisch erscheint, es werden die Grenzen und Gültigkeitsbereiche der referierten theoretischen Modelle auch im 1. Kapitel kaum angedeutet. Prinzipielle Ausführungen zur Tätigkeit und Anwendung der Modelltechnik auf die Tätigkeitsbeschreibung wären eine wertvolle Ergänzung des Buches. Es sei herausgehoben, daß die Autoren praktische Lösungen und Anwendungsbeispiele ausführlich erläutern. Die mathematischen Grundlagen der Regelungstechnik und die Methoden der Analyse stochastischer Signale werden beim Leserkreis vorausgesetzt.

B 1196 *K.-P. Timpe*

Prognose der Güte von Systemen. Von *V. A. Prochorenko, A. N. Smirnov.* Minsk: Nauka i technika. 190 Seiten, 55 Bilder, 22 Tafeln.

Eine aktuelle Aufgabe bei der Projektierung komplizierter technischer Systeme ist die Ermittlung von Lösungen, die bei Gewährleistung der geforderten Güte minimalen Aufwand erfordern. Als Gütekenngrößen treten dabei neben technischen Parametern strukturelle Kenngrößen, wie Kompliziertheit u. a., und Betriebskenngrößen, wie Zuverlässigkeit, Betriebsbereitschaft, Empfindlichkeit, Störanfälligkeit und Effektivität auf.

Diese Aufgabe ist nur lösbar, wenn alle Etappen der Projektierung im Zusammenhang betrachtet werden. Methodische Grundlage für die Analyse der Güte komplizierter technischer Systeme ist damit die Systemanalyse. Sie ermöglicht eine wissenschaftliche Begründung der notwendigen Gütenormen und ihre Prognose in jeder Etappe der Entwicklung des Systems. Anwendung finden neben Expertenschätzung und Extrapolationsverfahren komplizierte mathematische Modelle. Für die Zuverlässigkeit als wichtigste Kenngröße werden Methoden zur Identifikation gegeben, wobei zur Analyse der Zuverlässigkeit auch Methoden der Versuchsplanung Anwendung finden. Berücksichtigt wird die zeitliche Veränderung einzelner Kenngrößen z. B. durch Alterung, Ausfall u. a. Von den allgemeinen Positionen der Informationstheorie ausgehend kommen die Autoren zur Darlegung der Aufgaben der Projektierung effektiver Informationsmeßsysteme und zum Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Ausführlicher sind darüber hinaus die Strukturanalyse und der Zusammenhang zwischen Struktur und Gütekenngrößen behandelt.

B 1223 *J. Peters*

Einführung in die Methoden der Digitalrechnung. 5., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage. Von *W. Weber.* Westberlin: Elitera-Verlag. 224 Seiten, 181 Bilder, 67 Tafeln.

Im vorliegenden Buch wird schwerpunktmäßig der logische Entwurf von Digitalschaltungen aus der Sicht des Rechentechnikers behandelt. Zunächst werden die methodischen Grundlagen der Digitaltechnik erörtert, wobei die Zahlensysteme, Kodes und die Boolsche Algebra als Hilfsmittel zur Formulierung von Steuerungsaufgaben vorgestellt und z. T. bewertet werden.

Die Realisierungssysteme von digitalen Schaltungen werden in übersichtlicher Form beschrieben, einschließlich einiger moderner Grundprinzipien von hochintegrierten Schaltkreisen.

Im Vordergrund der Darstellung steht die Anwendung der Schaltkreise. Die behandelte Speichertechnik beschränkt sich auf bewährte Speichertechnologien, wie sie bis Mitte der 70er Jahre zur Anwendung kamen. Die Schaltkreissynthese stützt sich auf die Theorie der Automaten. Moderne Verfahren, die in der Literatur unter Computer Aided Design (CAD) abgehandelt werden, konnten offenbar im Rahmen dieses Handbuches nicht berücksichtigt werden.

Am Schluß des Buches werden Datenverarbeitungsanlagen klassischer Struktur, Arbeitsweise und Prozeßrechnersysteme beschrieben.

Das Buch gibt einen sehr guten Überblick und ist in verständlicher Form geschrieben.

B 1167 *H. Willem*

Kybernetik. Eine Einführung auf naturwissenschaftlicher Grundlage. Von *W. Kämmerer.* Berlin: Akademie-Verlag. 181 Seiten, 66 Bilder, 8,00 Mark.

Ausgangspunkt des informativ und anregend geschriebenen Taschenbuches bildet eine Dreiteilung des Aufgabenbereiches der Kybernetik im Hinblick auf die Untersuchung von Informationsprozessen als wesentlichem Element der Steuerung technischer, organischer und organisatorischer Systeme, die Analyse von Struktur- und Verhaltensweisen kybernetischer Systeme sowie die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse zum besseren Verständnis existierender Objekte oder zur Entwicklung von Systemen mit gewünschten Eigenschaften.

Nach einer Einführung in Inhalt, Aufgaben und Abstraktionsprozeß der Kybernetik geht der Verfasser auf grundlegende und spezielle Probleme der System-, Informations-, Steuerungs-, Algorithmen- und Spieltheorie ein. In 12 Kapiteln wird dabei ein Überblick über Information und Kommunikation, Systembeschreibung, Struktur- und Verhaltensmodelle, Steuerung und Anpassung, über Kodierung, Übertragung, Verarbeitung und Speicherung von Information in technischen und biologischen Systemen sowie über Algorithmen, formale Sprachen und Strategien zur Sicherung des Gleichgewichtszustandes von in Wechselwirkung stehenden Systemen gegeben.

An einer Reihe von Beispielen aus den verschiedensten Bereichen von der Naturwissenschaft, Medizin, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft (einschließlich instruktiver Vorgänge des täglichen Lebens) können somit das Gedankengut und das methodische Instrumentarium der Kybernetik unter Beschränkung des mathematischen Aufwandes einem breiten Leserkreis nahegebracht werden.

Als wohltuend empfindet man die Sachlichkeit und die Solidität der Darlegungen, die keinen Raum für Spekulationen — weder in bezug auf phantastische Perspektiven noch auf furchterregende Möglichkeiten — lassen.

Das Buch ist der Vielzahl derer, die sich mit neuen Erkenntnissen des wissenschaftlich-technischen Fortschritts im Überblick vertraut machen wollen, in gleicher Weise zu empfehlen wie den in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft Tätigen unterschiedlicher Fachdisziplinen; letztere werden infolge des Spektrums der behandelten Probleme nützliche Anregungen für eine „Zusammenschau" komplexer Fragestellungen erhalten.

B 1186 *H.-G. Lauenroth*

Feinwerktechnik '77. Auswirkung der Rationalisierung und Automatisierung auf Entwicklung und Fertigung in der Feinwerktechnik (VDI-Berichte 279). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH. 148 Seiten.

Der VDI-Bericht 279 enthält die Vorträge zur 1. Jahrestagung „Feinwerktechnik '77" der VDI/VDE-Gesellschaft Feinwerktechnik der BRD in Karlsruhe 1977.
Einführend werden Probleme des Strukturwandels, der in vielen Produktionsbereichen bei der Ablösung konventioneller Feinmechanik und Elektromechanik durch die Mikroelektronik beginnt, erörtert sowie allgemeine Organisationsprinzipien industrieller Arbeit dargestellt und Entwicklungstendenzen der Rationalisierung und Automatisierung durch den Einsatz von Prozeßrechnern und Mikroprozessoren aufgezeigt. Ein weiterer Beitrag befaßt sich mit den Grenzen der Meßtechnik, unter anderem an den Beispielen der Entwicklung der Mikroskopie von der Licht- bis zur Rasterelektronenmikroskopie und der Anwendung der Röntgenstrahlen in Verbindung mit den Anforderungen an die Präzisionsmechanik.
Nachfolgende Vorträge stellen dann beispielhaft Möglichkeiten der Rationalisierung und Automatisierung bei der Entwicklung und Fertigung ausgewählter Erzeugnisse, wie Kleinrechner, Fernschreiber, Kleinmotoren und Elektrizitätszähler, vor. Des weiteren werden unter anderem der Einsatz von Drahterodiermaschinen in der Feinwerktechnik behandelt und Möglichkeiten zur Automatisierung galvanischer Anlagen aufgezeigt. Die Darstellung von Erfahrungen mit dem Einsatz von Hilfsmitteln und Methoden beim Konstruieren in der Industrie sowie Übersichtsbeiträge zur Halbleiterfertigung im Wandel der Technologie und zu neuen Wegen bei der Entwicklung feinwerktechnischer Erzeugnisse durch Fortschritte auf dem Gebiet der Kunststoff- und Aluminium-Technologie runden das sehr differenzierte Tagungsprogramm ab.
Trotzdem verdeutlichen die meisten Vorträge die zunehmend engere Verflechtung von Feinwerktechnik und Mikroelektronik und vermitteln ein anschauliches Bild der Entwicklung dieses Fachgebietes. Der Leser des Berichts erhält durch die anschauliche Darstellung der ausgewählten Beispiele moderner, industriell gefertigter Erzeugnisse zugleich wertvolle Anregungen für die Lösung von Aufgaben in den Bereichen Entwicklung und Fertigung der Feinwerktechnik. B 1159 *W. Krause*

Logische Grundlagen der Versuchsplanung. Von *V. V. Nalimov* und *T. I. Golikova*. Moskau: Metallurgija. 128 Seiten, 8 Bilder, 27 Tafeln.

In der letzten Zeit sind eine Vielzahl von Publikationen zur Theorie des Experiments erschienen, darunter auch einige Monographien und Lehrbücher. Dabei werden in den praktisch orientierten Arbeiten Fragen der Anwendung der Versuchsplanung, der Auswertung der Versuchsergebnisse und ihrer Interpretation behandelt, während die theoretisch orientierten Arbeiten sich mit den dabei entstehenden speziellen mathematischen Problemen beschäftigen. Nach Meinung der Autoren fehlen jedoch geeignete Leitfäden zur Versuchsplanung, die insbesondere die allgemeinen theoretischen Grundlagen und die Ideologie der Versuchsplanung darlegen. Dementsprechend stellen sie sich das Ziel, eine formal-logische Analyse ihrer Vorstellungen vom Experiment zu geben. Die sich dabei herausbildende mathematische Theorie des Experiments wollen sie verstanden wissen nicht als neue mathematische Disziplin, sondern als Herausbildung eines formal-logischen Herangehens an die Untersuchung der Probleme des Experimentierens. Den Optimalkriterien des Experiments kommt demnach die Rolle von Axiomen zu, wobei sie bedingt eingeteilt werden können in statische und dynamische Kriterien. Umfangreiche langjährige Arbeiten eines Kollektivs der Moskauer Lomonossov-Universität zur Entwicklung geeigneter Versuchspläne und zur Schätzung ihrer Parameter ermöglichte die vorliegende Publikation, in der nach der Analyse des Begriffs „Experiment" und der Untersuchung „guter" und „schlechter" Experimente, Kriterien zur Beurteilung von Experimenten hergeleitet werden. Diesen Optimalkriterien ist hauptsächlich die gesamte Arbeit gewidmet, wobei eine Vielzahl in der Literatur üblicher Optimalkriterien angeführt, die entsprechenden Versuchspläne hergeleitet und für den Fall polynomialer Modelle verglichen werden. Weiterhin ist die Optimalität von Plänen für diskrete Faktoren untersucht. Anschließend behandeln die Autoren in entsprechend kurzen Kapiteln die Auswahl optimaler Strategien in dynamischen Aufgaben, Optimalkriterien bei der Auswahl wesentlicher Faktoren und bei Diskriminanzanalysen. Eine Übersicht über die wichtigste Literatur auf dem Gebiet der Theorie des Experiments ist enthalten. B 1141 *K.-H. Winter*

Physikalische Meßtechnik. Band 2: Meßprinzipien und Meßverfahren. Von *I. Niebuhr*. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag. 154 Seiten, 41 Bilder, 1 Tafel.

Dieser Band behandelt in einer umfassenden Übersichtsdarstellung die wesentlichsten der bekannten physikalischen Verfahrensprinzipien zur elektrischen Messung nichtelektrischer Größen; wobei neben der Messung geometrischer Größen, wie Länge, Winkel, Dehnung (Kraft), Schwingung, Füllstand, die grundlegenden physikalischen bzw. physikalisch-chemischen Verfahren der Prozeß- und Analysenmeßtechnik sowie des Umweltschutzes besondere Berücksichtigung fanden. Redundanzarme systematisierte Darstellung anhand einfacher Prinzip- und Blockschaltbilder, ergänzt durch Hinweise auf den ersten Band, der ausführlichere Erläuterungen zu physikalischen Wirkprinzipien und Schaltungen von Ausnehmern und Anpassungsgliedern enthält, ermöglichte die Erfassung einer größeren Anzahl von Verfahren nebst ihren spezifischen Eigenschaften auf relativ engem Raum. Die Lektüre des durch instruktive Rechenbeispiele und einen etwa 55 Titel umfassenden Quellennachweis kommt mit dem elementaren mathematisch-physikalischen Rüstzeug des Hochschulpensums aus und erscheint gut geeignet bei der Bearbeitung (prozeß-) meßtechnischer Aufgaben. Die Stoffgliederung enthält die Abschnitte Messen mechanischer Größen, Messen von Temperatur und Messen von Konzentrationen. B 1151 *G. Meister*

Elektronische Meßwertverarbeitung. Schaltungen und Systeme. Von *R. Fritz*. Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH. 218 Seiten, 198 Bilder, 6 Tafeln.

An Büchern über elektronische Schaltungen und an Applikationsbeispielen mangelt es sicher nicht, so daß man ein weiteres Buch dieser Kategorie ohne Emotionen zur Hand nimmt. Hinzu kommt, daß der Titelbegriff „Verarbeitung" oft mit digitalen Techniken in Verbindung gebracht wird. Erst bei näherer Durchsicht wird deutlich, daß die im Vorwort erklärte Absicht einer weitgehenden Beschränkung auf analoge Verarbeitungstechniken (mit dem Operationsverstärker als wesentliche Baueinheit) und der diesen Techniken zugrunde liegenden theoretischen Zusammenhänge zu einem Buch geführt hat, das sich von anderen Büchern ähnlichen Titels sinnvoll unterscheidet: Es wird davon ausgegangen, daß sehr viele Meßgrößen ihrer Natur nach analog sind, daß das „Wie" in vielen Applikationsberichten enthalten und ohnehin oft typenabhängig ist, das „Warum" dagegen länger tragfähig bleibt und eigenständige Entwicklungen stimuliert, und schließlich wird auf Schaltungen orientiert, die auf Grund ihrer Struktur und Wirkungsweise in integrierten Halbleitertechnologien gut realisierbar sind.
Behandelt werden, nach Klärung einführender Begriffe, die Elementarbausteine Operationsverstärker, Multiplizierer und Schalter, wobei Stabilitätsbetrachtungen anhand der Frequenzkennlinien sehr gründlich vorgenommen werden; es folgen die rechnerischen Verknüpfungen von Analogsignalen, die dazu notwendigen Verstärkerschaltungen, Funktionsgeber und aktiven Filter. Abschnitte über Digitalisierung von Analogsignalen und über Meßwertverarbeitungssysteme beschließen das Buch. Hier werden z. B. auch aktuelle Probleme unifizierter Systeme (Bus-Konzepte, Stromversorgung, Störbeeinflussung) unter den schon genannten verallgemeinerten Aspekten behandelt.
B 1166 *W. Richter*

Lehrgänge zur Anwendung der Mikroelektronik in der Automatisierungstechnik

Der FA Automatisierungsgeräte der WGMA veranstaltete in Zusammenarbeit mit der Humboldt-Universität zu Berlin, Sektion Elektronik, und dem KDT-Bezirksverband Potsdam einen Lehrgang „Anwendung der Mikroelektronik in der Automatisierungstechnik".

Der insbesondere für Projektanten und Wartungsingenieure vorgesehene Lehrgang fand erstmalig vom 27. November bis 1. Dezember 1978 internatsmäßig in Wusterhausen bei Kyritz statt und wird voraussichtlich im kommenden Jahr noch zweimal wiederholt werden.

Ausgehend von den Anforderungen der Automatisierungstechnik und den spezifischen Eigenschaften der Mikroelektronik wurden die Einsatzmöglichkeiten in der Prozeßautomatisierung, die hierdurch bewirkten Veränderungen verdeutlicht und die sich daraus ergebenden Konsequenzen dargestellt. Wesentliche durch den Einsatz der Mikroelektronik ermöglichte gerätetechnische Lösungen wurden an einigen konkreten DDR-Entwicklungen diskutiert.

Schwerpunkte des Lehrganges waren:

- Mikrorechnersysteme und Mikrorechner
- Automatisierungsstrukturen im Wandel durch die Mikroelektronik
- Programmierbare Steuereinrichtungen
- Einsatz der Mikroelektronik im ursalog 5000
- programmierbare digitale Regler
- Einsatz der Mikroelektronik in der neuen Automatisierungsgeneration ursadat 5000
- Einfluß der Mikrorechnertechnik auf die elektrisch-analoge Informationsverarbeitung und ihre Verarbeitungsalgorithmen
- Erfahrungen beim Einsatz der Mikrorechentechnik in der Gaschromatographie
- Einsatz von Mikroprozessoren in der Meß- und Prüftechnik
- Entwicklungsablauf (Hardware-Planung, Software-Erarbeitung)
- Folgerungen aus dem Einsatz der Mikroelektronik.

Weiterhin organisiert der Fachausschuß einen einwöchigen Lehrgang „Baugruppen und Steuereinrichtungen des Gerätesystems ursalog 4000/5000", der voraussichtlich im April 1979 stattfinden wird. Der Lehrgang wendet sich insbesondere an Projektanten für Steuereinrichtungen des Kraftwerksanlagenbaues, der Metallurgie, der Be- und Verarbeitungsmaschinen sowie der Nahrungsgüterwirtschaft. Nachstehende thematische Schwerpunkte werden in dem Lehrgang behandelt:

- Baugruppen und Einrichtungen des Gerätesystems ursalog 4000/5000
- Verbindungs- und steuerprogrammierbare Speicher
- Schaltungskonzeption ursalog 4000
- Hilfseinrichtungen
- praktische Demonstration einer Einrichtung.

Als Lehrgangsunterlagen werden Kenndatenblätter sowie umfangreiche Projektierungshinweise zur Verfügung gestellt.

Von der TH „Otto von Guericke" Magdeburg wurde mit Unterstützung des FA „Automatisierungsgeräte" durch Doz. Dr. *W. Kriesel* (wissenschaftliche Leitung) der Lehrgang „Mikrorechner — Gerätetechnik — Programmierung — Anwendung" vom 30. Oktober bis 3. November 1978 in Piesteritz durchgeführt. Er war speziell auf die Weiterbildung von Abteilungsleitern der BMSR-Technik der VVB Agrochemie und Zwischenprodukte ausgerichtet.

Schwerpunkte der Veranstaltung waren:

- Wandlungsprozesse in der BMSR-Geräte- und Anlagentechnik als Folge der Mikroprozessoreinsatzes
- Mikroprozessorperipherie (Daten- und Prozeßperipherie, A/D- und D/A-Umsetzung, Bus-Gestaltung)
- Programmierung
- Einsatzmethodik (hard- und software)
- Automatisierungsstrukturen auf der Basis von Mikroprozessoren
- Projektierung von Automatisierungsanlagen mit Mikroprozessoren
- Rundtischgespräch zu Einsatzproblemen in der Chemie.

msr 6819 *M. Schmeißer*

Mathematik und Systeme

Die Mathematik benötigt neue Probleme, um zu bestehen. Ohne diesen Einfluß wird sie steril, verkümmert und geht zugrunde. Das physikalische Universum hat diese Probleme in der Vergangenheit geliefert und wird dies auch in Zukunft tun. Erwähnt seien nur Astronomie, Mechanik, Elektrizität und Magnetismus, Quantenmechanik und Energieübertragung.

Die vom Menschen geschaffene Technik stellt viele interessante Fragen. Das Rad, die Maschine und der Digitalrechner sind insgesamt mit sehr bemerkenswerten Problemen verbunden. So hat beispielsweise das Rad zur Fourier-Analyse geführt, die Maschine zur Thermodynamik und zur Theorie der Approximation und der Digitalrechner zu verschiedenen neuen Theorien wie der dynamischen Optimierung. Zwei neue Problemquellen sind sichtbar geworden: der Mensch als System und soziale Systeme. Anscheinend war bisher jede realistische Beschreibung der damit in Zusammenhang stehenden Probleme zu kompliziert. Mit der Existenz von Digitalrechnern ist nunmehr eine derartige Beschreibung möglich. Zu einigen typischen Fragen, die mit der Betrachtung des Menschen als System verbunden sind, zählen:

- die Wirkung von Arzneimitteln auf den menschlichen Organismus,
- die Lokalisierung von Tumoren,
- die Behandlung von Tumorerkrankungen,
- die Arbeitsweise des Nervensystems,
- die Funktionsweise von Auge und Ohr,
- die Arbeitsweise des Gedächtnisses,
- die Art der medizinischen Befragung und Datengewinnung,
- die Gewährleistung der Homöostase des menschlichen Körpers.

Die Fragestellung nach der Homöostase ist für soziale Systeme von besonderer Bedeutung. Zwangsläufig entstehen mit der Einführung neuer Methoden und Techniken verschiedene Formen der Stabilität. Unsere weitere Existenz hängt wesentlich vom Verständnis dieser Zusammenhänge ab. Es ist durchaus möglich, daß wir es lernen werden, wie diese Stabilität durch das Studium der im menschlichen Organismus funktionierenden Mechanismen aufrechterhalten wird. Grundsätzlich bedeutet das, daß wir die Systeme studieren müssen. Es ist erforderlich, ihre Struktur und ihre Funktionsweise zu erkennen. In diesen Untersuchungen wird die Simulation eine besonders wichtige Rolle spielen. Bei der Entwicklung von Simulationsmodellen unterschiedlicher Prozesse kann die Theorie unscharfer Systeme in gleicher Weise wie alle Gebiete der klassischen Mathematik nutzbringend verwendet werden. Auf diese Weise dient die Simulation als ein Integrationsfaktor. Stärker müssen die Möglichkeiten der Analysis, der Algebra, der Topologie und der Logik ausgeschöpft werden.

Es ist unbestritten, daß es eine unbegrenzte Anzahl von Problemen auf den genannten Gebieten gibt. Viele von ihnen werden mit vorhandenen Verfahren zu lösen sein, viele erfordern die Schaffung neuer Methoden. In allen Fällen findet sich jedoch hier ein ideales Betätigungsfeld für junge Mathematiker.

R. Bellman, Universität Los Angeles

Aus: Z. Kybernetes 7 (1978) No. 1, pp. 7.

msr 6824

KURZFASSUNGEN

Fiala, V.: IA 3.2; 4.0.2.1

Beitrag zur Simulation hydraulischer Ventile

msr 22 (1979) H. 2, S. 62–65

Bei Untersuchungen der Stabilität hydraulischer Systeme mit Ventilen wurden Analogrechner mit Erfolg angewandt. Die im Beitrag erläuterte Simulation direktwirkender Ventile diente zur Lösungsvorbereitung für zweistufige Ventile. Hier werden ebenfalls erste Versuche durchgeführt.

Hennig, H.: IA 4.0.2.2

Zeit- und Bewegungsverhalten pneumatischer Linearantriebe

msr 22 (1979) H. 2, S. 65–70

Das Zeit- und Bewegungsverhalten pneumatischer Linearantriebe kann wegen seiner Abhängigkeit von vielen Einflußfaktoren sehr unterschiedlich sein. Die im Interesse der Optimierung von Pneumatikanlagen hinsichtlich des Masse- und Energieverbrauchs wichtige Vorausbestimmung dieses Verhaltens ist sehr schwierig. Der Beitrag enthält für den in der Praxis häufig auftretenden Fall der gleichbleibenden Belastung entlang des Kolbenhubes fertige Rechenergebnisse, die mit experimentell ermittelten Ergebnissen gut übereinstimmen und die der Projektant durch eine einfache Berechnung weniger Kennzahlen verwenden kann. Durch die Angabe der Strömungskennwerte in den Standards der Pneumatikgeräte ist für diese Berechnungsart eine wichtige Voraussetzung gegeben.

Ober, J.: IA 1.1.3

Anwendung der Entropie bei der Prozeßanalyse von wärmetechnischen Ausrüstungen

msr 22 (1979) H. 2, S. 71 und 72

In dem Beitrag wird die Anwendung der Entropie bei der theoretischen Prozeßanalyse vorgeschlagen. Im Vergleich zu der verbreiteten Benutzung der Enthalpie als Zustandsvariable bietet die Entropie einfacher aufgebaute Gleichungen leichtere mathematische Behandlung der Gleichungen bei gleichen Vereinfachungen und größere Genauigkeit der Beschreibung. Die Einführung der Entropie erlaubt auch eine exakte Beurteilung der thermodynamischen Qualität des untersuchten Prozesses.

Krauß, M.: IA 4.2.3.0

Zur Grenze der Meßgenauigkeit bei gestörten Übertragungssystemen

msr 22 (1979) H. 2, S. 78–80

Die bei gestörten analogen Meßinformationssystemen maximal erreichbare Genauigkeit der Erfassung der Meßwerte (Anzahl und Breite der Amplitudenstufen) wird aus informationstheoretischen Kenngrößen abgeleitet. Anhand praktisch wichtiger Beispiele werden dabei Abschätzungen und Verallgemeinerungen zur Grenze der Meßgenauigkeit solcher Systeme getroffen.

Gatzmanga, H.: IA 3.2

Automatische Überwachung prozeßanalytischer Meßeinrichtungen und Anlagen

msr 22 (1979) H. 2, S. 81–86

Die Anwenderforderungen nach wartungsarmen genauen Prozeßanalysatoren und Analysenmeßanlagen werden im zunehmenden Maß durch applikative Lösungen erfüllt, wobei jedoch ein Mehraufwand entsteht. Die angestellten Lösungen beinhalten eine Kombination von Maßnahmen, die fast immer mit internen und externen Selbstkorrektureinrichtungen verbunden sind. Der Einsatz von Rechnern ermöglicht zusätzlich eine Präzisierung des Präventivwartungszeitraumes und der durchzuführenden Eingriffe.

Schwarze, G.: IA 1.1.6; 4.0.5.2

Kombinierte Simulationssysteme

msr 22 (1979) H. 2, S. 97–101;

Bei der Bildung von Simulationsmodellen gewinnen kombinierte Modelle, die ereignisorientiert-diskrete und kontinuierliche Aspekte berücksichtigen, zunehmend an Bedeutung. Anhand eines Beispieles aus der Stahlindustrie wird die Notwendigkeit der Berücksichtigung dieser Modellklasse demonstriert. Entsprechende kombinierte Simulationssysteme werden in wesentlichen Aspekten vorgestellt und gekennzeichnet. Eine Liste international entwickelter digitaler kombinierter Simulationssysteme schließen diese einführende Darstellung mit Überblickscharakter ab.

Hildebrandt, H.-G.; Meißner, A.: IA 2.5.4

Verhalten modelladaptiver Systeme mit Relais-Adaptionsgesetz

msr 22 (1979) H. 2, S. 101–104

Für modelladaptive Systeme bei Grundsystemen sowohl mit als auch ohne Rückführung und festeingestelltem Bezugsmodell werden Adaptionsgesetze mit Relais-Anteil vorgestellt und die Existenz von Stabilitätsgebieten nachgewiesen. Konvergenzgeschwindigkeit und Verhalten werden experimentell untersucht und mit denen stetiger Varianten verglichen. Für die Dimensionierung der Adaptionsschleifenverstärkung ergeben sich erste Hinweise.

РЕЗЮМЕ

Fiala, V.: ИА 3.2; 4.0.2.1

Вклад в моделирование гидравлических вентилей

msr 22 (1979) № 2, стр. 62–65

При исследованиях устойчивости гидравлических систем с вентилями успешно применены аналоговые вычислительные машины. Описанное в данной статье моделирование прямо действующих вентилей служило для подготовки решения двухступенчатых вентилей. Также проведены первые опыты.

Hennig, H.: ИА 4.0.2.2

Характеристика пневматических линейных приводов по времени и движению

msr 22 (1979) № 2, стр. 65–70

Характеристика пневматических линейных приводов по времени и движению ввиду своей зависимости от ряда влияющих факторов может быть очень различна. В интересах оптимизации пневматических установок относительно расхода массы и энергии важно предварительное определение указанной характеристики, что однако очень трудно. В статье указаны готовые вычислительные результаты для часто получающегося на практике случая равномерной нагрузки вдоль хода поршня. Эти результаты хорошо совпадают с результатами, полученными экспериментально, которые проектант может использовать путем простого вычисления некоторых параметров. Указанием показателей течения в стандартах на приборы пневматики для данного вида вычисления дана важная предпосылка.

Ober, J.: ИА 1.1.3

Применение энтропии при анализе процессов теплотехнического оборудования

msr 22 (1979), № 2, стр. 71 и 72

В данной статье предложено применение энтропии при теоретическом анализе процессов. По сравнению с распространенным применением энтальфии как переменная, характеризующая состояние, энтропия показывает проще построенные уравнения, более легкое математическое рассмотрение уравнений при одинаковых упрощениях и более высокую точность описания. Введение энтропии допускает точной оценки термодинамического качества исследуемых процессов.

Krauß, M.: ИА 4.2.3.0

О пределах точности измерения при поврежденных системах передачи

msr 22 (1979) № 2, стр. 78–80

Точность сбора измеряемых значений (число и ширина ступеней амплитуд), максимально достигнутая при поврежденных аналоговых информационных системах измерения, выведена от информационно-теоретических показателей. На основании важных на практике примеров при этом указаны оценки и обобщения по пределам точности измерения таких систем.

Gatzmanga, H.: ИА 3.2

Автоматический контроль измерительных преобразователей и установок для анализа процесса

msr 22 (1979) № 2, стр. 81–86

Требования потребителей к точным анализаторам процесса с небольшим обслуживанием и измерительно-аналитическим установкам в возрастающей мере выполняются путем аппликативных решений, причем, однако, возникают повышенные затраты. Принятые решения содержат комбинацию мер, почти всегда связанных со внутренними и внешними устройствами автокоррекции. Использование вычислителей дополнительно обеспечивает уточнение периода предварительного осмотра и производимых вмешательств.

Schwarze, G.: ИА 1.1.6; 4.0.5.2

Комбинированные системы моделирования

msr 22 (1979), № 2, стр. 97–101

При создании моделей для исследования приобретают все большее значение комбинированные модели, учитывающие дискретные и непрерывные аспекты, ориентированные на события. На примере в области стальной промышленности показана необходимость учета данного класса модели. В основных аспектах представлены и обозначены соответствующие комбинированные системы моделирования. В заключении указанных изложений с характером обзора приведен перечень цифровых комбинированных систем моделирования, разработанных в международном масштабе.

Hildebrandt, H.-G.; Meißner, A.: ИА 2.5.4

Поведение моделирующих согласующих систем с законом релейной адаптации

msr 22 (1979), № 2, стр. 101–104

Для моделирующих согласующих систем при основных системах как с обратной связью, так и без нее и с зафиксированной контрольной (базисной) моделью, представлены законы адаптации с релейной составляющей и доказано существование областей стабильности. Экспериментально исследованы скорость сходимости и поведение и сравнены с соответствующими параметрами непрерывных вариантов. Для размерности усиления адаптации петли обратной связи получены первые указания.

SUMMARIES

Fiala, V.: IA 3.2; 4.0.2.1

Contribution to the Simulation of Hydraulic Valves

msr 22 (1979) No. 2, pp. 62–65

The author points out that analogue computers were successfully applied for studying the stability of hydraulic systems containing valves. In this contribution the simulation of directly working valves is explained in order to prepare the solution for two-stage valves. In this field first experiments are carried out, too.

Hennig, H.: IA 4.0.2.2

Time and Movement Behavior of Pneumatic Linear Drives

msr 22 (1979) No. 2, pp. 65–70

The time and movement behavior of pneumatic linear drives may be very different due to its dependence upon many influencing factors. The determination of this behavior important for the optimization of pneumatic drives as to mass and energy consumption is very difficult. For the case of constant charge along the piston stroke often arising in practice the author presents computation results which agree with results determined experimentally and may be used by the engineer due to a simple calculation of a few indices. The flow indices being given in the standards of pneumatic devices, an important presupposition for this way of calculation exists.

Ober, J.: IA 1.1.3

Application of the Entropy in the Process Analysis of Heating Plants

msr 22 (1979) No. 2, pp. 71 and 72

In this contribution the author proposes the application of the entropy in the theoretical process analysis. In comparison with the wide-spread use of the enthalpy as state variable the entropy leads to simpler equations, easier mathematical treatment and greater accuracy of the description. The introduction of the entropy also allows an exact judgement of the thermodynamic quality of the process studied.

Krauß, M.: IA 4.2.3.0

On the Limit of the Measuring Accuracy with Disturbed Transfer Systems

msr 22 (1979) No. 2, pp. 78–80

From information-theoretic indices the author derives the accuracy maximally obtainable in the measurement value acquisition (number and width of the amplitude steps) in the case of disturbed analogue measuring information systems. By means of practically important examples estimations and generalizations as to the limit of the measurement accuracy are obtained.

Gatzmanga, H.: IA 3.2

Automatic Supervision of Process Analysers and Measurement Equipment

msr 22 (1979) No. 2, pp. 81–86

The users' requirements for maintenance-free exact process analysing and measuring equipment are more and more met by individual solutions causing increased expense. These solutions represent combinations of measures connected with internal and external self-correcting deviesc. The use of computers additionally allows a specification of the preventive maintenance time interval and the interventions to be taken.

Schwarze, G.: IA 1.1.6; 4.0.5.2

Combined Simulation Systems

msr 22 (1979) No. 2, pp. 97–101

The author points out that combined models which take into consideration event-oriented discrete and continuous aspects become more and more important in the field of simulation. By means of an example from steel industries he demonstrates the necessity of taking into account this model class. Such combined simulation systems are presented and characterized. Finally, a list of digital combined simulation systems developed within the international scope is added.

Hildebrandt, H.-G.; Meißner, A.: IA 2.5.4

Behavior of Model-Reference Systems with Relay Adaptation Law

msr 22 (1979) No. 2, pp. 101–104

For model-reference adaptive systems in the case of basic systems with or without feedback and with fixed reference model the authors present adaptation laws with relay part and prove the existence of stability regions. Speed and behavior of convergency are studied experimentally and compared with continuous system variants. Finally, hints for dimensioning the adaptation loop gain are given.

RÉSUMÉS

Fiala, V.: IA 3.2; 4.0.2.1

Une contribution à la simulation de valves hydrauliques

msr 22 (1979) No. 2, pp. 62–65

L'auteur souligne que des calculatrices analogiques étaient employées avec succès près des études de la stabilité de systèmes hydrauliques à valves. Dans cette contribution, la simulation de valves travaillant directement est expliqué pour préparer la solution pour des valves à deux étages. Dans ce champ aussi, des premières expériences sont exécutées.

Hennig, H.: IA 4.0.2.2

Le comportement de temps et de mouvement d'entraînements linéaires pneumatiques

msr 22 (1979) No. 2, pp. 65–70

Le comportement de temps et de mouvement d'entraînements linéaires pneumatiques peut être très différent à cause de sa dépendance de beaucoup de facteurs d'influence. La détermination de ce comportement étant très importante pour l'optimisation d'entraînement pneumatique quant à la consommation de masse et d'énergie est très difficile. Pour le cas d'une charge constante le long de la levée de piston, un cas apparaissant très souvent dans la pratique, l'auteur présente des résultats de calcul qui sont d'accord avec des résultats déterminés expérimentalement et peuvent être utilisés par l'ingénieur sur la base d'un simple calcul de quelques indices. Les indices de flux étant donnés dans les standards des dispositifs pneumatiques, une supposition importante pour ce mode de calcul existe.

Ober, J.: IA 1.1.3

L'emploi de l'entropie près l'analyse de processus d'installations à chaleur

msr 22 (1979) No. 2, pp. 71 et 72

Dans cette contribution, l'auteur propose l'emploi de l'entropie près l'analyse théorique de processus. En comparaison avec l'usuel emploi de l'enthalpie comme variable d'état, l'entropie offre des équations plus simples, un traitement mathématique plus facile et une plus grande précision de la description. L'introduction de l'entropie aussi permet de juger exactement la qualité thermo-dynamique du processus étudié.

Krauß, M.: IA 4.2.3.0

Sur la limite de la précision de mesure près de systèmes de transfert perturbés

msr 22 (1979) No. 2, pp. 78–80

A partir d'indices information-théoriques, l'auteur dérive la précision maximalement obtenable près l'acquisition des données de mesure (nombre et largeur des étages d'amplitude) en cas de systèmes analogiques perturbés d'information de mesure. A l'aide d'exemples pratiquement importants, des estimations et des généralisations sont obtenues.

Gatzmanga, H.: IA 3.2

La surveillance automatique de dispositifs d'analyse et de mesure de processus

msr 22 (1979) No. 2, pp. 81–86

Les exigences des usagers pour des dispositifs d'analyse et de mesure exacts à petite maintenance sont de plus en plus remplies par des solutions individuelles conduisant à une dépense augmentée. Ces solutions représentent une combinaison de mesures liées avec des dispositifs d'auto-correction internes et externes. L'emploi de calculatrices permet additionnellement de préciser l'intervalle de temps de maintenance préventive et les interventions à réaliser.

Schwarze, G.: IA 1.1.6; 4.0.5.2

Des systèmes de simulation combinés

msr 22 (1979) No. 2, pp. 97–101

L'auteur souligne que des modèles combinés qui tiennent compte d'aspects orientés sur événement discrets et continus deviennent de plus en plus importants. A l'aide d'un exemple de l'industrie d'acier il démontre la nécessité de la considération de cette classe de modèle. Tels systèmes de simulation combinés sont présentés et caractérisés. Enfin, une liste de systèmes de simulation combinés digitaux développés en cadre international est ajoutée.

Hildebrandt, H.-G.; Meißner, A.: IA 2.5.4

Le comportement de systèmes adaptifs à modèle de référence avec loi d'adaptation à relais

msr 22 (1979) No. 2, pp. 101–104

Pour des systèmes adaptifs à modèle de référence en cas de systèmes de base avec ou sans retour et avec modèle de référence fixe, les auteurs présentent des lois d'adaptation à relais et prouvent l'existence de domaines de stabilité. La vitesse et le comportement de convergence sont étudiés expérimentalement et comparés avec des variantes de systèmes continus. Enfin, des renvois pour le dimensionnement du gain de la boucle d'adaptation sont donnés.

Bestellschein



Die aufgeführten Bücher können Sie mit diesem Bestellschein im Inland beim örtlichen Buchhandel oder über den Buchdienst Berlin, 102 Berlin, Rungestr. 20, bestellen.

Expl.

Bauelemente- und Schaltungsentwurf
Reihe Elektronische Festkörperbauelemente
Von *H. Ahlers*, *W. Gaskarow* und *J. Waldmann*
1. Aufl., 268 Seiten, zahlr. Bilder und Tafeln, 17,00 Mark
Bestell-Nr. 552 622 5 ....

Probleme der Festkörperelektronik
Band 10
Von einem Autorenkollektiv
1. Aufl., 176 Seiten, 105 Bilder, 21 Tafelm. 20,00 Mark
Bestell-Nr. 552 624 1

Nichtlineare Systeme der Regelungstechnik
Reihe: Theoretische Grundlagen der automatischen Steuerung
Von *K. Göldner* und *St. Kubik*
1. Aufl., 232 Seiten, 215 Bilder, 4 Tafeln, 17,00 Mark
Bestell-Nr. 552 603 0

Wärmepumpen für Industrie, Landwirtschaft und Gesellschaftsbau
Reihe: Luft- und Kältetechnik
Von *G. Heinrich*, *H. Najork* und *W. Nestler*
1. Aufl., 202 Seiten, 148 Bilder, 26 Tafeln, 25,00 Mark
Bestell-Nr. 552 699 7

Darüber hinaus können Sie alle in der „msr" angezeigten und rezensierten Bücher des VEB Verlag Technik ebenfalls mit diesem Vordruck bestellen.

Expl.

....

....

....
Name, Vorname

....
Anschrift mit Postleitzahl

....
Datum Unterschrift

messen · steuern · regeln

Herausgeber	Kammer der Technik
Verlag	VEB Verlag Technik DDR-102 Berlin, Oranienburger Str. 13/14 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn dd
Verlagsleiter	Dipl.-Ök. *Herbert Sanding*
Readktion	Dipl.-Ing.-Ök. *Ruth Gutjahr*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870362); Ing. *Jürgen Fest*, Redakteur (Telefon: 2870374)
Lizenz-Nr.	1112 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
AN (EDV)	15936
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	4,00 M, Abonnementpreis vierteljährlich 12,00 M; Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Gesamtherstellung	VEB Druckerei „Thomas Müntzer", 582 Bad Langensalza (ASMW)
	Umschlag – eingetragene Schutzmarke des Warenzeichenverbandes Regelungstechnik e. V., Berlin
Anzeigenannahme	DDR-Anzeigen: DEWAG Berlin, 1026 Berlin, Rosenthaler Str. 28–31 (Telefon: 2362776), und alle DEWAG-Zweigstellen. Anzeigenpreisliste Nr. 6 Auslandsanzeigen: Interwerbung, DDR-104 Berlin, Tucholskystr. 40
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
Bezugsmöglichkeiten	
DDR	sämtliche Postämter; örtlicher Buchhandel; VEB Verlag Technik
UdSSR	Gebiets- und Städtische Abteilungen von Sojuzpečat und Postämter
SVR Albanien	Spedicioni Shtypit te Jashtem, Tirane
VR Bulgarien	Direkzia R.E.P., 11a, Rue Paris, Sofia
VR Polen	ARS POLONA, Krakowskie Przedmieście 7, 00-068 Warszawa
SR Rumänien	Directia Generala a Postei si Difuzarii Presei, Palatul Administrativ, Bucuresti
ČSSR	PNS, Vinohradská 46, 12043 Praha 2 PNS, Gottwaldovo nám. 48, 88419 Bratislava
Ungarische VR	P.K.H.I., P.O.B. 16, 1426 Budapest
Republik Kuba	Instituto Cubano del Libro, Centro de Exposición, Belascoain 864, La Habana
VR China	China National Publications Import Corporation, P.O. Box 88, Peking
SR Vietnam	XUNHASABA, 32, Hai Ba Trung, Hanoi
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knijga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzeće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
BRD und Westberlin	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstr. 111, Berlin (West) 30; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141–167, Berlin (West) 52, sowie weitere Grossisten und VEB Verlag Technik, DDR-102 Berlin, Postfach 293
Österreich	Globus Buchvertrieb, Höchstädtplatz 3, 1200 Wien
Schweiz	Genossenschaft Literaturvertrieb, Cramerstr. 2, 8004 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Buchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, DDR-701 Leipzig, Postfach 160; VEB Verlag Technik, DDR-102 Berlin, Postfach 293

Annahmebedingungen

Die Redaktion veröffentlicht nur solche Beiträge, die noch an keiner anderen Stelle des In- und Auslandes in dieser Form erschienen sind oder bis zur Veröffentlichung erscheinen werden und die die Verfasser bis zum Ablauf des ersten, dem Erscheinen folgenden vollen Kalenderjahres an keiner anderen Stelle veröffentlichen, ohne hierzu vorher die Zustimmung der Redaktion der Zeitschrift eingeholt zu haben. Mit der Annahme und Veröffentlichung des Manuskriptes geht das ausschließliche Verlagsrecht für alle Sprachen und Länder auf den Verlag über.Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung der Redaktion nicht gestattet, fotografische Vervielfältigungen, Mikrofilme u. a. von Heften der Zeitschrift, einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen. Ferner behält sich die Redaktion Änderungsvorschläge nach der Durcharbeitung der Beiträge vor. Genehmigungspflichtige Beiträge müssen den Vermerk enthalten, daß beim Autor ein schriftliches Einverständnis des Betriebes bzw. des Instituts vorliegt.

Richtlinien für die Manuskriptgestaltung sind dem Heft 1 (Beilage) messen · steuern · regeln 1979 zu entnehmen bzw. werden von der Redaktion auf Anfrage zugesandt. Die Einhaltung dieser Gesichtspunkte garantiert eine sofortige Bearbeitung und verzögerungsfreie Veröffentlichung der Arbeit in der Zeitschrift.

Hierbei handelt es sich um neue Titel aus der UdSSR, die dem sowjetischen Neuerscheinungsdienst "Novye knigi" entnommen sind. Die Bücher können über den Volksbuchhandel bezogen werden.

[1] Ocenka kačestva ASU. Opyt ob'edinenija „Lenelektronmaš" (Gütcabschätzung von ASU. Erfahrungen des Kombinats „Lenelektromasch"). Lenizdat. 1,32 Rbl. 4. Quart. 1978. NK-No. 1 – 78 (51)

[2] *Utkin, N. F.:* Osnovy avtomatizacii proizvodstvennych processov (Grundlagen der Automatisierung von Produktionsprozessen). Lenizdat. 0,60 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 1 – 78 (113).

[3] *Bozojan, Š. E., Petrosjan, A. V.:* Matematičeskie metody povyšenija nadežnosti logičeskich schem (Mathematische Methoden zur Erhöhung der Zuverlässigkeit logischer Schaltungen). Izd-vo AN Arm SSR. 3,06 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 2 – 78 (49).

[4] *Gabasov, R., Kirillova, F. M.:* Metody linejnogo programmirovanija Čast' 2: Transportnye zadači (Methoden der linearen Optimierung. Teil 2: Transportaufgaben). Izd-vo Belorusskogo un-ta 1,87 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 2 – 78 (50).

[5] *Kutojanc, Ju. A.:* Statističeskie zadači dlja slučajnych processov (Statistische Aufgaben für stochastische Prozesse) Izd-vo AN Arm SSR. 0,90 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 2 – 78 (53).

[6] *Vorob'ev, V. G., Kadyšev, I. K.:* Aviacionnye pribory upravljajuščich sistem (Geräte von Steuerungssystemen in Flugzeugen). Transport. 0,54 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 2 – 78 (141).

[7] *Dimitraki, P.:* Proektirovanie banka dannych avtomatizirovannych sistem (Projektierung von Datenbanken automatisierter Systeme). Kartja Moldovenjaske. 0,65 Rbl., 4. Quart. 1978. NK-No. 3 – 78 (26).

[8] *Krasovskij, N. N., Osipov, Ju. S.:* Pozicionnoe upravlenie v sistemach s raspredelennymi parametrami (Positionssteuerung in Systemen mit verteilten Parametern). Nauka. 1,50 Rbl., 1. Quart. 1978. NK-No. 4 – 78 (14).

[9] *Kostarev, V. F., Cygankov, V. I.:* Cifrovye izmerenija v ustrojstvach železnodorožnoj avtomatiki i telemechaniki (Digitale Messung in Anlagen der Eisenbahnautomatik und Fernwirktechnik). Transport. 0,43 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 4 – 78 (35).

[10] *Brajlovskij, N. O., Granovskij, B. I.:* Modelirovanie transportnych sistem (Modellierung von Transportsystemen). Transport. 1,20 Rbl., 4. Quart. 1978. NK-No. 4 – 78 (51).

[11] Avtomatizirovannye sistemy upravlenija (Automatisierte Steuerungssysteme). Transport. 1,21 Rbl., 4. Quart. 1978. NK-No. 4 – 78 (58).

[12] *Bulov, A. A., Nevolin, V. V., Savin, V. I.:* Avtomatizirovannye sistemy upravlenija vodnym transportom (Automatisierte Steuerungssysteme des Wassertransports). Transport. 1,10 Rbl., 2. Quart. 1978. NK-No. 4 – 78 (293).

[13] *Gucalenko, G. V., Zagrivnaja, N. F., Sipač, L. A.:* Matematičeskie metody v ekonomičeskom analize na predprijatijach legkoj promyšlennosti (Mathematische Methoden in der ökonomischen Analyse in Betrieben der Leichtindustrie). Vyšejšaja škola (BSSR). 0,43 Rbl., 1. Quart. 1978. NK-No. 5 – 78 (11).

[14] *Sedegov, R. S., u. a.:* Avtomatizirovannye sistemy upravlenija predprijatiem (Automatisierte Steuerungssysteme von Betrieben). Vyšejšaja škola (BSSR). 1,97 Rbl., 4. Quart. 1978. NK-No. 5 – 78 (30).

[15] Avtomatika i vyčislitel'naja technika. Sbornik. Vyp. 8 (Automatik und Rechentechnik. Sammelband. Ausg. 8). Vyšejšaja škola (BSSR). 1,50 Rbl., 4. Quart. 1978. NK-No. 5 – 78 (51).

[16] Voprosy stroitel'stva i architektury. Sbornik. Vyp 8: Avtomatizirovannye sistemy upravlenija stroitel'stvom (Fragen des Bauwesens und der Architektur. Sammelband. Ausg. 8: Automatisierte Systeme der Steuerung des Bauwesens). Vyšejšaja škola (BSSR). 1,50 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 5 – 78 (55).

[17] *Balaševič, V. A.:* Algoritmizacija matematičeskich metodov planirovanija i upravlenija (Algorithmierung der mathematischen Planungs- und Steuerungsmethoden). Vyšejšaja škola (BSSR). 0,49 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 5 – 78 (243).

[18] *Kočergin, A. I.:* Avtomaty i avtomatičeskie linii (Automaten und automatische Linien). Vyšejšaja škola (BSSR) 0,87 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 5 – 78 (257).

[19] *Pospelov, G. E., Fedin, V. T.:* Proektirovanie električeskich setej i sistem (Projektierung elektrischer Netze und Systeme). Vyšejšaja škola (BSSR). 0,87Rbl. 1. Quart. 1978. NK-No. 5 – 78 (266).

[20] *Kozel, M. M.:* Osnovy avtomatizacii proizvodstva (Automatisierung der Produktion). Vyšejšaja škola (BSSR). 0,70 Rbl., 1. Quart. 1978. NK-No. 5 – 78 (284).

[21] *Azlarov, T. A.*, u. a.: Verojatnostnye processy i matematičeskaja statistika (Wahrscheinlichkeitstheoretische Prozesse und mathematische Statistik). Fan (UzSSR). 1,50 Rbl., 2. Quart. 1978. NK-No. 6 – 78 (36).

[22] *Beljaev, D. S.:* Rešenie složnych optimizacionnych zadač v uslovijach neopredelennosti (Lösung komplizierter Optimierungsaufgaben unter Unbestimmtheitsbedingungen). Nauka. 0,90 Rbl., 2. Quart. 1978. NK-No. 6 – 78 (39).

[23] Vyčislitel'nye metody v matematičeskoj fizike, geofizike i optimal'nom upravlenii (Numerische Methoden in der mathematischen Physik, Geophysik und optimalen Steuerung). Nauka. 2,90 Rbl., 4. Quart. 1978. NK – No. 6 – 78 (40).

[24] *Evreinov, E. V., Chorošcvskij, V. G.:* Odnorodnye vyčislitel'nye sistemy (Homogene rechentechnische Systeme). Nauka. 3,50 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 6 – 78 (42).

[25] *Kaganovič, B. M.:* Diskretnaja optimizacija teplovych setej (Diskrete Optimierung von Wärmenetzen). Nauka. 0,90 Rbl., 1. Quart. 1978. NK-No. 6 – 78 (44).

[26] Matematičeskij analiz i smežnye voprosy matematiki (Mathematische Analyse und angrenzende Fragen der Mathematik). Nauka. 3,53 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 6 – 78 (45).

[27] Obučajuščiesja algoritmy v sistemach upravlenija i obrabotki informacii (Lernende Algorithmen in Steuerungssystemen und Informationsverarbeitung). Nauka. 0,90 Rbl., 2. Quart. 1978. NK-No. 6 – 78 (46).

[28] *Kabulov, V. K.:* Algoritmizacija v mechanizme splošnych sred (Algorithmierung in Mechanismen kompakter Medien). Fan(UzSSR). 2,61 Rbl., 4. Quart. 1978. NK-No. 6 – 78 (109).

[29] *Ladikov, Ju. P.:* Stabilizacija processov v splošnych sredach (Stabilisierung von Prozessen in kompakten Medien). Nauka 2,36 Rbl., 4. Quart. 1978. NK-No. 6 – 78 (110).

[30] *Karmyšev, G. P.:* Sistemnyj podchod k dialektičeskoj logike (Systemtheoretisches Herangehen zur dialektischen Logik). Nauka (KazSSR). 2,71 Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 7 – 78 (4).

[31] Organizacionno-pravovye problemy ASU (Organisatorische-rechtliche Probleme der ASU). Nauka. 2,30 Rbl., 2. Quart. 1978. NK-No. 7 – 78 (33) .

[32] *Mamonov, L. K., Kim, G. G.:* Matematičeskoe modelirovanie fiziologičeskich processov rastenij (Mathematische Modellierung physiologischer Prozesse bei Pflanzen). Nauka (KazSSR). 1,96 Rbl., 2. Quart. 1978. NK-No. 7 – 78 (127).

[33] Matematičeskie metody i elektronnovyčislitel'naja technika v gornom proizvodstve (Mathematische Methoden und elektronische Rechentechnik in Bergbauproduktion). Nauka (KazSSR). 2,11Rbl., 3. Quart. 1978. NK-No. 7 – 78 (147).

[34] *Rjazancev, G. K.:* Ustojčivost' i upravljaemost' šachtnych ventiljacionnych sistem (Stabilität und Steuerbarkeit von Schachtventilationssystemen) Nauka (KazSSR). 2,56 Rbl., 1. Quart. 1978. NK-No. 7 – 78 (156).

[35] *Liberman, V. B.:* Organizacija mašinnoj obrabotki informacii po ekonomičeskomu analizu (Organisation der maschinellen Informationsverarbeitung bei der ökonomischen Analyse). Finansy 0,20 Rbl., 2. Quart. 1978. NK-No. 8 – 78 (36).

[36] Algoritmizacija i avtomatizacija processov vodoraspredelenija (Algorithmierung und Automatisierung der Prozesse der Wasserverteilung). Ilim(KirgSSR). 0,97 Rbl., 2. Quart. 1978. NK-No. 8 – 78 (99).

msr 6667

Zuverlässige, exakte Protokolle

liefert der Motorkompensator MK als Einfach-Linienschreiber MKE und als 3-, 6- und 12fach Punktdrucker MKV.

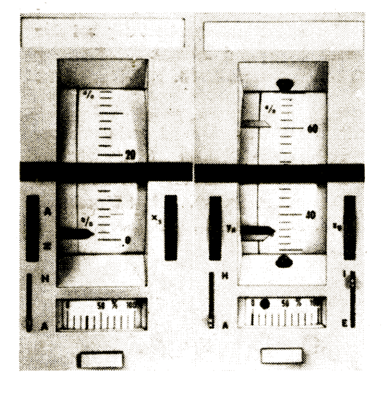
Wo der MK auch eingesetzt wird, in bezug auf Präzision beim Messen, Registrieren und Auswerten der Daten, erfüllt er hohe Ansprüche.

Das Kompensations-Meßprinzip gewährleistet Messungen mit einer Genauigkeitsklasse von 0,25%. Seine Schreibbreite von 250 mm garantiert eine exakte Auswertung aller registrierten Daten.

Als 12fach Punktdrucker ist der MKV mit zwei Meßbereichen ausrüstbar. Die Meßkreise sind eigensicher.

3 Grundausführungen mit 6 Zusatzeinrichtungen und umfangreichen Anpassungsmöglichkeiten an die jeweilige Meßaufgabe machen den MK universell einsetzbar.

Bitte fordern Sie Sie Prospekte an!



DDR-AUTOMATISIERUNGSGERÄTE



HEIM-ELECTRIC
EXPORT-IMPORT
VOLKSEIGENER AUSSENHANDELSBETRIEB DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
DDR-1026 BERLIN · ALEXANDERPLATZ
HAUS DER ELEKTROINDUSTRIE